

TUGAS AKHIR - TM141585

STUDI EKSPERIMEN PENGARUH SILINDER PENGANGGU TERHADAP PERFORMA TURBIN ANGIN SAVONIUS

**“Studi Kasus untuk Perbandingan $d/D=0,5$; $S/D=1,8$;
 $Re=97000$; 145000 ; dan 178000 ; $y/D=0,0$; $0,25$; dan $0,5$ ”**

TSALATSATUL MAULIDIYAH
NRP. 02111440000075

Dosen Pembimbing
Prof. Dr. Ir. Tri Yogi Yuwono, DEA.

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018



TUGAS AKHIR - TM141585

STUDI EKSPERIMEN PENGARUH SILINDER PENGANGGU TERHADAP PERFORMA TURBIN ANGIN SAVONIUS

**“Studi Kasus untuk Perbandingan $d/D=0,5$; $S/D=1,8$;
 $Re=97000$; 145000 ; dan 178000 ; $y/D=0,0$; $0,25$; dan $0,5$ ”**

TSALATSATUL MAULIDIYAH
NRP. 02111440000075

Dosen Pembimbing
Prof. Dr. Ir. Tri Yogi Yuwono, DEA.

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018



FINAL PROJECT - TM141585

***EXPERIMENTAL STUDY ON THE EFFECT OF
DISTRUBANCE CYLINDER ON THE
PERFORMANCE OF SAVONIUS WIND TURBINE***

***“Case Study for Comparison $d/D=0.5$; $S/D=1.8$;
 $Re=97000$; 145000 ; and 178000 ; $y/D=0.0$; 0.25 ; and
 0.5 ”***

TSALATSATUL MAULIDIYAH
NRP. 02111440000075

Advisor
Prof. Dr. Ir. Tri Yogi Yuwono, DEA.

DEPARTEMENT OF MECHANICAL ENGINEERING
Faculty Of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute Of Technology
Surabaya 2018

**STUDI EKSPERIMEN PENGARUH SILINDER
PENGANGGU TERHADAP PERFORMA TURBIN
ANGIN SAVONIUS**

“Studi Kasus untuk Perbandingan $d/D=0,5$; $S/D=1,8$; $Re=97000$;
145000; dan 178000; $y/D=0,0$; $0,25$; dan $0,5$ ”

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Program Studi S-1 Departemen Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

TSALATSATUL MAULIDIYAH

NRP. 02111440000075

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Prof. Dr. Ir. Tri Yogi Yuwono, DEA. (Pembimbing)
NIP. 196001291987011001
2. Dr. Wawan Aries Widodo, ST, MT (Penguji I)
NIP. 197104051997021001
3. Vivien Suphandani, ST, M.Eng, PhD (Penguji II)
NIP. 198105292003122001

SURABAYA

JULI, 2018

STUDI EKSPERIMEN PENGARUH SILINDER PENGANGGU TERHADAP PERFORMA TURBIN ANGIN SAVONIUS

“Studi Kasus untuk Perbandingan $d/D = 0,5$; $S/D = 1,8$; $Re = 97000$; 145000 ; dan 178000 ; $y/D = 0,0$; $0,25$; dan $0,5$ ”

Nama Mahasiswa : Tsalatsatul Maulidiyah
NRP : 02111440000075
Jurusan : Teknik Mesin FTI-ITS
Dosen Pembimbing : Prof. Dr.Ir. Triyogi Yuwono, DEA

Abstrak

Saat ini untuk memenuhi kebutuhan energi listrik, Indonesia sangat bergantung pada minyak bumi dan batu bara. Dengan keterbatasan jumlah energi fosil, dibutuhkan energi alternatif untuk menghindari krisis energi dimasa mendatang. Indonesia sebagai negara kepulauan memiliki potensi angin yang melimpah, sehingga dapat dimanfaatkan sebagai pembangkit listrik tenaga angin. Turbin angin Savonius merupakan turbin angin dengan dua sudu yang bekerja karena adanya perbedaan gaya hambat pada sudu-sudu turbin. Selain memiliki konstruksi sederhana, turbin ini mampu berputar pada kecepatan rendah. Kelemahan turbin angin Savonius adalah memiliki efisiensi yang rendah, sehingga perlu dilakukan penelitian untuk meningkatkan performa turbin angin Savonius dengan pemberian silinder pengganggu didepan returning blade.

Penelitian ini dilakukan secara eksperimen dengan menggunakan axial fan sebagai penghasil sumber angin. Benda uji berupa turbin angin Savonius dua sudu dengan diameter sudu (D) 165,2 mm, tinggi (H) 294,4 mm, diameter turbin (L) 303,4 mm, diameter poros (b) 19 mm dan diameter end plate 321 mm. Untuk meningkatkan performa turbin, ditempatkan silinder pengganggu yang memiliki diameter (d) 88,8 mm dan tinggi 500 mm di depan returning blade dengan jarak $S/D=1,8$ serta $y/D=0,0$; $0,25$, dan

0,5 pada bilangan Reynolds 97000, 145000, dan 178000. Pengukuran kecepatan aliran angin menggunakan anemometer, sedangkan pengukuran torsi statis menggunakan alat torsimeter. Putaran turbin diukur menggunakan tachometer dan torsi dinamis diukur dengan menggunakan brake dynamometer. Dari putaran dan torsi dinamis ini, nantinya akan diperoleh berapa besar daya yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius.

Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa pada bilangan Reynolds=97000, pemberian silinder pengganggu $d/D=0,5$ di depan returning blade pada jarak $S/D=1,8$ dan $y/D=0,5$ terbukti efektif meningkatkan putaran turbin angin Savonius sebesar 7,82% dan torsi statis sebesar 3,96% at $\theta=40^\circ$. Selain itu, pemberian silinder pengganggu pada jarak $y/D=0, 0,25$, dan $0,5$ terbukti tidak efektif meningkatkan Coefficient of Power (CoP) dan Coefficient of Moment (Cm) turbin angin Savonius pada bilangan Reynolds=97000, 145000, dan 178000.

Kata kunci: *Coefficient of Power, perbandingan y/D , silinder pengganggu, bilangan Reynolds, turbin Savonius.*

EXPERIMENTAL STUDY ON THE EFFECT OF DISTRUBANCE CYLINDER ON THE PERFORMANCE OF SAVONIUS WIND TURBINE

“Case Study for Comparison $d/D = 0.5$; $S/D = 1.8$; $Re = 97000$;
 145000 ; dan 178000 ; $y/D = 0.0$; 0.25 ; and 0.5 ”

Name : Tsalatsatul Maulidiyah
NRP : 02111440000075
Department : Mechanical Engineering FTI-ITS
Advisory Lecturer : Prof. Dr.Ir. Triyogi Yuwono, DEA

Abstract

Currently to meet the needs of electrical energy, Indonesia is very dependent on petroleum and coal. With the limited amount of fossil energy, alternative energy is needed to avoid future energy crises. Indonesia as an archipelago country has abundant wind potential, so it can be used as a wind power plant. Savonius wind turbine is a wind turbine with two blades that work due to the difference in drag force on the turbine blades. In addition to having a simple construction, this turbine is able to spin at low speed. Unfortunately, among the existing wind turbine, the Savonius wind turbine has the lowest efficiency, so this research has been done to improve the performance of Savonius wind turbine by installing the distrubance cylinder in front of the returning blade.

This experiment was conducted experimentally using axial fan as a source of wind. The test specimen is a two-blade Savonius wind turbine with a diameter of the blade (D) 165,2 mm, height (H) 294,4 mm, turbine diameter (L) 303,4 mm, axle diameter (b) 19 mm and a 321 mm end plate diameter. To improve turbine performance, a distrubance cylinder with a diameter (d) of 88.8 mm and a height of 500 mm is installed in front of the returning blade at distance of $S/D=1.8$ and $y/D=0.0$; 0.25 , and 0.5 on the Reynolds number= 97000 , 145000 , and 178000 . Measurements of

wind velocity using an anemometer, while static torque is measured using a torsimeter. Turbine rotation is measured using a tachometer and dynamic torque is measured using a brake dynamometer. From this dynamic rotation and torque, will be obtained how much power generated by Savonius wind turbine.

The result of this research shows that on the Reynolds number=97000, installing a disturbance cylinder $d/D=0.5$ in front of returning blade at distance of $S/D=1.8$ and $y/D=0.5$ can effectively increase the speed of the Savonius wind turbine by 3.49% and static torque of the Savonius wind turbine by 3.96% at $\theta=40^\circ$. Installing a disturbance cylinder at the distance of $y/D=0.0$; 0.25 and 0.5 is ineffective to increase Coefficient of Power (CoP) and Coefficient of Moment (Cm) on the Reynolds number=97000, 145000, and 178000.

Keywords: Coefficient of Power, comparison of y/D , disturbance cylinder, Reynolds number, Savonius turbine.

KATA PENGANTAR

Puji syukur kepada Allah SWT, yang telah memberikan rahmat dan petunjuk sehingga Tugas Akhir ini dapat terselesaikan dengan baik.

Penyusunan tugas akhir ini dapat terlaksana baik tidak lepas dari bantuan berbagai pihak. Untuk itu, pada kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih kepada :

1. Keluarga penulis, Bapak Kasmu'in, Ibuk Nur Hidayah, Mbak Iik, Mas Nidhom terimakasih atas segala doa dan dukungan yang selalu diberikan.
2. Bapak Prof. Dr. Ir. Triyogi Yuwono, DEA, selaku dosen pembimbing tugas akhir yang telah memberikan bimbingan, ilmu, dan semangat kepada penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
3. Ibu Vivien Suphandani, ST, ME, Ph.D, Dr. Wawan Aries Widodo, ST, MT, dan Dr. Ir. Heru Mirmanto selaku dosen penguji seminar proposal dan sidang Tugas Akhir yang telah memberikan ilmu, saran dan masukan untuk perbaikan Tugas Akhir ini.
4. Bapak Ir. Bambang Pramujati, M.Sc.Eng., Ph.D. selaku Kepala Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember
5. Bapak Ir. Sampurno, MT selaku dosen wali penulis serta seluruh dosen dan karyawan Jurusan Teknik Mesin FTI ITS. Terima kasih atas ilmu dan bimbingannya selama ini.
6. Bapak Sutrisno, terimakasih atas bantuan dan saran yang telah diberikan dalam penyelesaian tugas akhir ini.
7. PT. Petrokimia Gresik yang telah memberikan beasiswa kepada penulis selama menempuh kuliah di Teknik Mesin ITS.
8. Mukaromah dan Rachma Dwi M, sahabat penulis sejak mahasiswa baru hingga selamanya. Terimakasih telah menemani selama empat tahun ini. Terimakasih atas hiburan,

percakapan sehari-hari, dukungan, doa dan semangat yang telah diberikan.

9. M57 dan Departemen Hubungan Luar HMM yang telah menjadi keluarga penulis saat menempuh pendidikan di Teknik Mesin ITS.
10. Tim Savonius kelompok 4, Jasmi, Linun, Ayup, Clarissa, Eka, Meika, Riri, Vita, Ammar, Mas Yung, dan Mas Andri yang bersama-sama menyelesaikan Tugas Akhir ini.
11. Semua pihak yang telah membantu penulis dalam menyelesaikan perkuliahan S1 yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu.

Penulis menyadari masih banyak kekurangan dalam penyusunan tugas akhir ini. Oleh sebab itu, penulis sangat mengharapkan saran dan masukan dari semua pihak. Penulis berharap semoga tugas akhir ini dapat memberikan manfaat dan sumbangsih bagi perkembangan ilmu pengetahuan.

Surabaya, Juli 2018

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	
LEMBAR PENGESAHAN	
ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL	xv
DAFTAR SIMBOL	xvii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	5
1.3 Tujuan	7
1.4 Batasan Masalah	7
1.5 Manfaat Penelitian	8
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	9
2.1 Turbin Angin	9
4.1.1 <i>Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT)</i>	10
4.1.2 <i>Vertical Axis Wind Turbine (VAWT)</i>	10
2.2 Turbin Angin Savonius	12
2.3 Aliran melalui Silinder	13
2.4 Gaya Hambat	15
2.5 Bilangan Reynolds	17
2.6 <i>Tip Speed Ratio</i>	17
2.7 <i>Rope Brake Dynamometer</i>	18
2.8 <i>Coefficient of Power</i> dan <i>Coefficient of Moment</i>	19
2.9 Penelitian Terdahulu	20
2.9.1 Pengurangan Gaya Hambat Sebuah Silinder Sirkular pada Aliran Udara	21
2.9.2 Pengurangan Gaya Hambat pada Silinder Sirkular dengan Menggunakan Silinder Pengganggu Tipe I	23

2.9.3 Studi Eksperimen Peningkatan Performa Turbin Angin Savonius dengan Pemberian Plat Penghalang.....	26
2.9.4 Studi Eksperimen Peningkatan Performa Turbin Angin Savonius.....	30
2.9.5 Studi Eksperimen Peningkatan Performa Turbin Angin Savonius dengan Pemberian Silinder Pengganggu.....	34
2.9.6 Efek Lebar Plat Penghalang Terhadap Performa Turbin Angin Savonius.....	37
BAB III METODE PENELITIAN.....	43
3.1 Analisa Dimensi.....	43
3.3.1 Analisa Dimensi untuk <i>Coefficient of Power</i>	45
3.3.1 Analisa Dimensi untuk <i>Coefficient of Moment</i>	48
3.2 Peralatan	51
3.2.1 <i>Axial Fan</i>	51
3.2.2 Benda Uji.....	52
3.2.3 Penyangga Turbin Angin Savonius	55
3.2.4 <i>Honeycomb</i>	56
3.2.5 <i>Voltage Regulator</i>	56
3.2.6 Pelumas	57
3.2.7 Alat Ukur	58
3.3 Prosedur Penelitian	64
3.3.1 Prosedur menentukan putaran dan torsi dinamis .	64
3.3.2 Prosedur menentukan torsi statis	65
3.4 Flowchart Penelitian	67
3.4.1 Flowchart menentukan putaran dan torsi dinamis.....	67
3.4.2 Flowchart menentukan torsi statis	70
BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN	73
4.1 Contoh Perhitungan	73
4.1.1 Perhitungan Bilangan Reynolds	73
4.1.2 Perhitungan <i>Tip Speed Ratio</i>	74
4.1.3 Perhitungan Torsi Dinamis.....	75
4.1.4 Perhitungan <i>Coefficient of Power</i>	75

4.1.5	Perhitungan <i>Coefficient of Moment</i>	76
4.2	Analisa Performa Turbin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu.....	77
4.2.1	Analisa Nilai Putaran (n) terhadap Bilangan Reynolds (Re) Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu	77
4.2.2	Analisa Nilai <i>Coefficient of Power</i> (CoP) terhadap <i>Tip Speed Ratio</i> (λ) Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu	78
4.2.3	Analisa Nilai <i>Coefficient of Moment</i> (Cm) terhadap <i>Tip Speed Ratio</i> (λ) Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu	80
4.2.4	Analisa Nilai Torsi Statis (Ts) terhadap Posisi angular sudu (θ) Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu	82
4.3	Analisa Performa Turbin Angin Savonius Dengan Silinder Pengganggu	84
4.3.1	Analisa Nilai Putaran terhadap Bilangan Reynolds (Re) Turbin Angin Savonius Dengan Silinder Pengganggu.....	84
4.3.2	Analisa Nilai <i>Coefficient of Power</i> (CoP) terhadap <i>Tip Speed Ratio</i> (λ) Turbin Angin Savonius Dengan Silinder Pengganggu.....	90
4.3.3	Analisa Nilai <i>Coefficient of Moment</i> (Cm) terhadap <i>Tip Speed Ratio</i> (λ) Turbin Angin Savonius Dengan Silinder Pengganggu.....	96
4.3.4	Analisa Nilai Torsi Statis (Ts) terhadap Posisi angular sudu (θ) Turbin Angin Savonius Dengan Silinder Pengganggu pada $y/D=0,5$	101
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....		107
5.1	Kesimpulan	107
5.2	Saran	107
DAFTAR PUSTAKA		109
LAMPIRAN		111
BIODATA PENULIS		xviii

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 <i>Horizontal Axis Wind Turbine</i>	11
Gambar 2.2 <i>Darrieus Vertical Axis Wind Turbine</i>	12
Gambar 2.3 Turbin Savonius dengan dua sudu.	13
Gambar 2.4 (a) Aliran <i>inviscid</i> , (b) Aliran <i>viscous</i>	14
Gambar 2.5 Skema sederhana gaya <i>drag</i> dan <i>lift</i>	15
Gambar 2.6 Grafik hubungan <i>coefficient of power</i> turbin angin dengan <i>tip speed ratio</i>	18
Gambar 2.7 Mekanisme <i>rope brake dynamometer</i>	19
Gambar 2.8 Skema Penelitian.....	21
Gambar 2.9 Distribusi tekanan sekitar silinder pengganggu	22
Gambar 2.10 Grafik <i>drag coefficient</i> terhadap bilangan Reynolds	22
Gambar 2.11 Skema penelitian tampak samping	24
Gambar 2.12 Distribusi koefisien tekanan pada silinder sirkular dengan variasi sudut potong pada $Re=5,3 \times 10^4$	25
Gambar 2.13 Variasi sudut potong silinder pengganggu terhadap perbandingan C_D/C_{D0} pada $Re=5,3 \times 10^4$	25
Gambar 2.14 Parameter geometris turbin angin Savonius	26
Gambar 2.15 Parameter geometris plat penghalang	27
Gambar 2.16 Efek panjang plat penghalang terhadap maksimum <i>coefficient of power</i>	28
Gambar 2.17 Efek putaran terhadap sudut plat penghalang pada curtain 1	29
Gambar 2.18 Grafik efek torsi terhadap putaran turbin	29
Gambar 2.19 Grafik hubungan antara <i>coefficient of power</i> dan <i>tip speed ratio</i>	30
Gambar 2.20 Skema penelitian (1) <i>wind tunnel</i> (2) <i>bearing</i> (3) <i>steel housing</i> (4) <i>steel shaft</i> (5) <i>blades</i> dan (6) <i>endplate</i>	31
Gambar 2.21 Hubungan antara <i>coefficient of power</i> dengan kecepatan angin dengan variasi jumlah <i>blade</i>	31
Gambar 2.22 Grafik hubungan antara <i>specific power</i> dengan kecepatan angin dengan variasi tingkat turbin	32
Gambar 2.23 Grafik hubungan antara daya dengan kecepatan angin dengan variasi <i>overlap ratio</i>	32

Gambar 2.24 Grafik hubungan antara <i>coefficient of power</i> dengan kecepatan angin dengan variasi <i>aspect ratio</i>	33
Gambar 2.25 Grafik hubungan antara daya dengan kecepatan angin dengan variasi ada tidaknya <i>endplate</i>	33
Gambar 2.26 Grafik perbandingan putaran antara turbin angin Savonius berpengganggu dan tanpa silinder pengganggu (n/n_0) sebagai fungsi jarak pada $S/D = 1,4 - 2,4$	35
Gambar 2.27 Grafik perbandingan torsi statis antara turbin angin Savonius berpengganggu dan tanpa silinder pengganggu (T/T_0) sebagai fungsi jarak pada $S/D = 1,4 - 2,4$	35
Gambar 2.28 Grafik torsi statis turbin angin Savonius berpengganggu (T) sebagai fungsi sudut (θ) pada jarak $S/D=1,7$	36
Gambar 2.29 Grafik perbandingan <i>coefficient of power</i> antara turbin angin Savonius berpengganggu dan tanpa silinder pengganggu (CoP/CoP_0) sebagai fungsi jarak pada $S/D = 1,4 - 2,4$	37
Gambar 2.30 Skema Penelitian	38
Gambar 2.31 Grafik perbandingan CoP/CoP_0 terhadap fungsi S/D pada $Re=30000$ dan 90000	38
Gambar 2.32 Grafik Perbandingan T/T_0 terhadap fungsi S/D pada $Re=30000$ dan 90000	39
Gambar 2.33 Aliran di sekitar turbin angin Savonius pada $Re=30000$: (a) vektor kecepatan (b) kontur tekanan; $Re=90000$: (c) vektor kecepatan (d) kontur tekanan	39
Gambar 2.34 Kontur tekanan turbin angin Savonius dengan plat penghalang untuk $Re=30000$: (a) $S/D=1,00$, (b) $S/D=1,02$, (c) $S/D=1,03$, (d) $S/D=1,15$, (e) $S/D=1,41$ dan (f) $S/D=2,00$	40
Gambar 2.35 Kontur tekanan turbin angin Savonius dengan plat penghalang untuk $Re=90000$: (a) $S/D=1,00$, (b) $S/D=1,02$, (c) $S/D=1,03$, (d) $S/D=1,15$, (e) $S/D=1,41$ dan (f) $S/D=2,00$	40
Gambar 3.1 Susunan penyangga dan turbin angin Savonius tampak depan.....	43
Gambar 3.2 Skema penelitian dan parameter-parameter pengujian.	44

Gambar 3.3 <i>Axial fan</i> SPV-18.	51
Gambar 3.4 Skema penelitian (mm)	52
Gambar 3.5 Dimensi turbin angin Savonius (mm)	53
Gambar 3.6 IBC GERMANY 6201 THBP Bearing	54
Gambar 3.7 Dimensi silinder pengganggu (mm).....	55
Gambar 3.8 Dimensi penyangga turbin angin Savonius (mm) ..	55
Gambar 3.9 <i>Honeycomb</i>	56
Gambar 3.10 Voltage regulator model TDGC 2J-3	57
Gambar 3.11 Pelumas WD-40.	57
Gambar 3.12 Tachometer OMEGA seri HHT13.	58
Gambar 3.13 Torsimeter LUTRON Torque Meter Model: TQ-8800.	59
Gambar 3.14 Omega HHF141 Digital Anemometer.	60
Gambar 3.15 Skema <i>brake dynamometer</i>	61
Gambar 3.16 Timbangan pegas NAGATA.....	61
Gambar 3.17 Anak timbangan	62
Gambar 3.18 Benang nylon LAZER.....	63
Gambar 4.1 Grafik putaran (n) terhadap bilangan Reynolds (Re) turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu.....	77
Gambar 4.2 Grafik <i>Coefficient of Power</i> (CoP) terhadap <i>tip speed ratio</i> (λ) turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu	78
Gambar 4.3 Grafik <i>Coefficient of Moment</i> (Cm) terhadap <i>tip speed ratio</i> (λ) turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu	80
Gambar 4.4 Grafik torsi statis (Ts) terhadap posisi angular sudu (θ) turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu	82
Gambar 4.5 Grafik putaran (n) terhadap bilangan Reynolds (Re) turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu dan dengan silinder pengganggu pada $y/D=0$	84
Gambar 4.6 Grafik putaran (n) terhadap bilangan Reynolds (Re) turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu dan dengan silinder pengganggu pada $y/D=0,25$	86

Gambar 4.7 Grafik putaran (n) terhadap bilangan Reynolds (Re) turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu dan dengan silinder pengganggu pada $y/D=0,5$	88
Gambar 4.8 Grafik <i>Coefficient of Power</i> (CoP) terhadap <i>tip speed ratio</i> (λ) turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu dan tanpa pengganggu pada bilangan Reynolds=97000.....	90
Gambar 4.9 Grafik <i>Coefficient of Power</i> (CoP) terhadap <i>tip speed ratio</i> (λ) turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu dan tanpa pengganggu pada bilangan Reynolds=145000.....	92
Gambar 4.10 Grafik <i>Coefficient of Power</i> (CoP) terhadap <i>tip speed ratio</i> (λ) turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu dan tanpa pengganggu pada bilangan Reynolds=178000.....	94
Gambar 4.11 Grafik <i>Coefficient of Moment</i> (Cm) terhadap <i>tip speed ratio</i> (λ) turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu dan tanpa pengganggu pada bilangan Reynolds=97000.....	96
Gambar 4.12 Grafik <i>Coefficient of Moment</i> (Cm) terhadap <i>tip speed ratio</i> (λ) turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu dan tanpa pengganggu pada bilangan Reynolds=145000.....	98
Gambar 4.13 Grafik <i>Coefficient of Moment</i> (Cm) terhadap <i>tip speed ratio</i> (λ) turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu dan tanpa pengganggu pada bilangan Reynolds=178000.....	100
Gambar 4.14 Grafik torsi statis (T_s) terhadap posisi angular sudu (θ) turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu dan dengan silinder pengganggu $y/D=0,5$ pada bilangan Reynolds=97000.....	102
Gambar 4.15 Grafik torsi statis (T_s) terhadap posisi angular sudu (θ) turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu dan dengan silinder pengganggu $y/D=0,5$ pada bilangan Reynolds=145000.....	104
Gambar 4.16 Grafik torsi statis (T_s) terhadap posisi angular sudu (θ) turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu dan dengan silinder pengganggu $y/D=0,5$ pada bilangan Reynolds=178000.....	106

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Perbedaan VAWT dan HAWT	12
Tabel 2.2 Data koefisien <i>drag</i> pada berbagai macam permukaan ($Re \geq 103$)	16
Tabel 2.3 Variasi dimensi plat penghalang	27
Tabel 2.4 Maksimum <i>coefficient of power</i> hasil eksperimen.....	28
Tabel 3.1 Spesifikasi <i>axial fan</i> CKE SPV-18	52
Tabel 3.2 Spesifikasi IBC GERMANY 6201 THBP <i>Bearing</i>	54
Tabel 3.3 Spesifikasi <i>voltage regulator</i> model TDGC 2J-3	57
Tabel 3.4 Spesifikasi pelumas WD-40.....	58
Tabel 3.5 Spesifikasi Tachometer OMEGA seri HHT13.	59
Tabel 3.6 Spesifikasi LUTRON <i>Torque Meter</i> Model: TQ-8800.	59
Tabel 3.7 Spesifikasi Omega HHF141 Digital Anemometer.	60
Tabel 3.8 Spesifikasi timbangan pegas NAGATA	62
Tabel 3.9 Spesifikasi anak timbangan	62
Tabel A.1 Data penelitian turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu pada bilangan Reynolds=97000.....	111
Tabel A.2 Data penelitian turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu pada bilangan Reynolds=145000.....	111
Tabel A.3 Data penelitian turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu pada bilangan Reynolds=178000.....	113
Tabel A.4 Data penelitian turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada jarak $y/D=0$ pada bilangan Reynolds=97000.....	114
Tabel A.5 Data penelitian turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada jarak $y/D=0$ pada bilangan Reynolds=145000.....	115
Tabel A.6 Data penelitian turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada jarak $y/D=0$ pada bilangan Reynolds=178000.....	116
Tabel A.7 Data penelitian turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada jarak $y/D=0,25$ pada bilangan Reynolds=97000.....	116

Tabel A.8 Data penelitian turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada jarak $y/D=0,25$ pada bilangan Reynolds=145000.....	118
Tabel A.9 Data penelitian turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada jarak $y/D=0,25$ pada bilangan Reynolds=178000.....	119
Tabel A.10 Data penelitian turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada jarak $y/D=0,5$ pada bilangan Reynolds=97000.....	120
Tabel A.11 Data penelitian turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada jarak $y/D=0,5$ pada bilangan Reynolds=145000.....	121
Tabel A.12 Data penelitian turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada jarak $y/D=0,5$ pada bilangan Reynolds=178000.....	122
Tabel A.13 Data torsi statis turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu dan dengan silinder pengganggu pada jarak $y/D=0,5$	123
Tabel A.14 Data peningkatan putaran turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu.	124
Tabel A.15 Data peningkatan CoP turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu.	124
Tabel A.16 Data peningkatan C_m turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu.	124
Tabel A.17 Data uniformity pada jarak 2900 mm	125

DAFTAR SIMBOL

D	diameter sudu turbin angin Savonius (m)
L	panjang karakteristik turbin angin Savonius (m)
H	tinggi turbin angin Savonius (m)
b	diameter poros (m)
h	tinggi silinder pengganggu (m)
y	jarak silinder pengganggu dalam arah tegak lurus dengan arah datangnya angin (m)
S	jarak antara pusat silinder pengganggu dengan pusat <i>returning blade</i> (m)
C_D	<i>coefficient drag</i>
F_D	<i>gaya drag</i>
P_{out}	<i>power output</i>
P_{in}	<i>power input</i>
T	torsi dinamis turbin (Newton.meter)
T_s	torsi statis turbin (N-cm)
n	putaran dari turbin (rpm)
ω	kecepatan angular dari turbin (rad/s)
V	kecepatan angin (m/s)
ρ	massa jenis udara (kg/m ³)
A	<i>cross sectional area</i> (m ²)
CoP	<i>Coefficient of Power</i>
Cm	<i>Coefficient of Moment</i>
T_s	torsi statis (N-cm)
θ	posisi angular sudu (°)
λ	<i>tip speed ratio</i>
r	Jari-jari turbin (m)
R	jari-jari poros (mm)
μ	Viskositas dinamis fluida
Re	Reynolds Number

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia merupakan negara dengan penduduk terbesar di Asia Tenggara. Sebanding dengan banyaknya penduduk Indonesia, penggunaan energi oleh masyarakat Indonesia juga semakin tinggi. Hal ini membawa Indonesia sebagai negara dengan tingkat konsumsi energi terbesar di Asia Tenggara, dimana jumlah permintaan energi Indonesia setara dengan gabungan permintaan energi Singapura, Thailand dan Malaysia. Pada tahun 2000 sampai dengan 2015, permintaan Indonesia terhadap energi listrik naik sebesar 150%. Saat ini untuk memenuhi kebutuhan energi listrik, Indonesia sangat bergantung pada minyak bumi dan batu bara. Berdasarkan *Outlook Energi Indonesia 2017*, cadangan terbukti minyak bumi Indonesia terus menurun dari 5,9 miliar barel pada tahun 1995 menjadi 3,7 miliar barel pada akhir 2015 dan diperkirakan habis dalam kurun waktu 11 tahun sedangkan sumber daya batubara selama kurun waktu 4 tahun terakhir cadangan batubara mengalami penurunan akibat produksi batubara untuk pemenuhan konsumsi domestik dan komoditas ekspor serta diperkirakan cadangan batubara akan habis dalam waktu 70 tahun jika tidak ditemukan adanya cadangan baru. Dengan keterbatasan jumlah energi fosil tersebut, dibutuhkan energi alternatif untuk menghindari krisis energi dimasa mendatang.

Indonesia sebagai negara kepulauan yang memiliki banyak pesisir diuntungkan dengan potensi angin yang melimpah. Ditengah potensi angin yang melimpah, berdasarkan *Outlook Energi Indonesia 2017*, energi angin di Indonesia mampu menghasilkan daya sebesar 970 MW, namun sampai 2013 penggunaan energi angin hanya 1,96 MW. Meskipun kecepatan rata-rata angin yang tergolong rendah antara 4,0-5,0 m/s (LIPI,2007) bukan berarti tidak bermanfaat. Dengan besar kecepatan tersebut mampu menghasilkan daya skala menengah 10-

100kW yang dapat dimanfaatkan untuk memberi pasokan listrik ke rumah-rumah warga. Selain jumlahnya yang tidak terbatas di bumi, energi angin juga termasuk energi ramah lingkungan karena tidak mengakibatkan polusi. Dalam pemanfaatannya menjadi energi listrik, energi angin mampu menggerakkan turbin, kemudian energi gerak turbin diubah menjadi energi listrik melalui generator sehingga turbin menjadi komponen yang paling penting untuk menghasilkan energi gerak yang maksimal. Karena memiliki konstruksi *simple*, mampu bekerja pada kecepatan rendah dan *noise* yang rendah, turbin Savonius menjadi salah satu alternatif turbin yang dapat digunakan untuk pemanfaatan energi angin.

Turbin Savonius pertama kali dikembangkan oleh S.J. Savonius pada tahun 1920. Konsep turbin Savonius berupa sebuah silinder yang dibagi menjadi dua bagian kemudian bagian tengahnya disatukan sehingga membentuk huruf S dengan sumbu vertikal. Turbin Savonius memiliki dua blade yaitu *returning blade* dan *advancing blade*. *Returning blade* adalah *blade* pada sisi cekung sedangkan *advancing blade* merupakan *blade* pada sisi cembung. Karena memiliki bentuk *blade* yang berbeda, gaya hambat yang dihasilkan oleh kedua *blade* tersebut juga berbeda. Perbedaan gaya hambat antara kedua *blade* menghasilkan torsi sehingga turbin dapat berputar. Dengan adanya torsi dan kecepatan angular turbin, maka dapat dihasilkan daya dari turbin angin. Turbin angin Savonius memiliki efisiensi yang paling rendah dibanding tipe turbin lainnya. Oleh karena itu banyak upaya yang dilakukan oleh para peneliti untuk meningkatkan kinerja turbin angin Savonius.

Untuk meningkatkan performa aerodinamik dari turbin Savonius, banyak penelitian yang telah dilakukan oleh *scientist* baik secara eksperimen maupun numerik. Altan et al (2008) melakukan penelitian dengan menempatkan dua buah penghalang berupa plat. Penghalang *a* ditempatkan didepan *returning blade* dengan panjang ℓ_1 dengan sudut sebesar α terhadap sumbu vertikal yang bertujuan untuk mengurangi torsi negatif pada turbin sedangkan penghalang *b* ditempatkan diujung *advancing blade*

dengan panjang ℓ_2 dengan sudut sebesar β untuk mempersempit sisi masuk angin. Penelitian dilakukan pada kecepatan rata-rata angin sebesar 7 m/s dengan bilangan Reynolds sebesar $1,5 \times 10^5$. Dari penelitian tersebut, didapatkan peningkatan *power coefficient* (CoP) sebesar 38% pada panjang ℓ_1 sebesar 45 cm dengan sudut α sebesar 45° sedangkan panjang ℓ_2 sebesar 52 cm dengan sudut β sebesar 15° .

Triyogi et al (2009) melakukan penelitian untuk mengurangi gaya hambat pada silinder sirkular. Penelitian ini dilakukan didalam *subsonic wind tunnel* pada bilangan Reynolds $5,3 \times 10^4$ dengan menempatkan silinder pengganggu tipe I di depan silinder sirkular pada jarak $S/d = 1,375$ dengan sudut iris silinder pengganggu $\theta_s = 0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 53^\circ$, dan 65° . Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa silinder pengganggu sangat efektif untuk mengurangi gaya hambat pada silinder sirkular, dimana silinder pengganggu tipe I ini memberikan *streamline* yang simetris disekitar silinder sirkular dan menyebabkan hilangnya titik stagnasi pada silinder sirkular serta menunda terjadinya separasi pada silinder sirkular. Akibatnya, daerah *wake* dibelakang silinder sirkular menjadi lebih sempit. Sudut iris 65° dengan sudut stagger 0° menghasilkan pengurangan gaya hambat yang paling tinggi dan menghasilkan pengurangan lebih besar 52% jika dibandingkan dengan silinder tunggal.

Penelitian yang dilakukan oleh **Mahmud Rifai et al (2012)** bertujuan untuk meningkatkan performa turbin angin Savonius dengan bervariasi jumlah sudu, jumlah *stage* turbin, *overlap ratio*, *aspect ratio* dan ada tidaknya *endplate*. Penelitian ini dilakukan dengan menempatkan turbin pada sisi *downstream exit windtunnel* tipe *suction* dengan kecepatan 0-13 m/s. Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa turbin angin Savonius dengan dua sudu mampu memperoleh *coefficient of power* lebih tinggi dibanding turbin dengan tiga atau empat sudu. Turbin angin Savonius *double stage* memperoleh *specific power* lebih tinggi dibanding dengan turbin angin Savonius *single stage*. Variasi *overlap ratio* menunjukkan bahwa turbin tanpa *overlap*

menghasilkan *coefficient of power* yang lebih tinggi dibandingkan turbin dengan *overlap*, sedangkan variasi *aspect ratio* menunjukkan bahwa semakin besar *aspect ratio*, semakin besar pula *coefficient of power*. Selain itu, *endplate* juga mempengaruhi performa turbin angin Savonius dengan meningkatkan besarnya *coefficient of power*.

Penelitian mengenai peningkatan performa turbin Savonius juga dilakukan oleh **Pradhito et al (2016)**. Penelitian ini dilakukan dengan menempatkan pengganggu berupa silinder yang berdiameter 50,8 mm dan tinggi 500 mm di depan *returning blade* untuk mengurangi terjadinya gaya hambat dengan variasi jarak S/D antara 1,5 – 2,4. Sumber aliran udara berasal dari *blower* dengan variasi bilangan Reynolds 30,000, 60,000 dan 90,000. Hasil dari penelitian tersebut menunjukkan bahwa penempatan silinder pengganggu di depan *returning blade* pada jarak $S/D=1,7$ terbukti efektif untuk meningkatkan performa turbin Savonius. Putaran turbin Savonius mengalami peningkatan sebesar 1,32 kali pada bilangan Reynolds 30,000 jika dibandingkan dengan turbin tanpa pengganggu. Selain itu, kenaikan torsi statis dan *Coefficient of Power* maksimum turbin dengan silinder pengganggu berturut-turut mencapai sebesar 1,42 kali, dan sebesar 3,99 kali. Untuk bilangan Reynolds 60000 dan 97000 putaran maksimum dari turbin dengan silinder pengganggu terjadi pada jarak S/D 1,7 yakni sebesar 1,26 kali dan 1,11 kali putaran turbin tanpa silinder pengganggu. Sedangkan nilai torsi statis dan *Coefficient of Power* maksimum turbin dengan silinder pengganggu berturut-turut mencapai sebesar 1,62 kali dan 5,52 kali untuk $Re = 60000$, serta sebesar 1,49 kali dan 1,5 kali untuk $Re = 97000$.

Berdasarkan penelitian-penelitian terdahulu mengenai turbin Savonius, maka perlu dilakukan penelitian untuk meningkatkan performa turbin Savonius. Dalam penelitian ini, peningkatan performa turbin Savonius dilakukan dengan menempatkan silinder pengganggu yang berukuran $d/D = 0,5$ di depan *returning blade* pada jarak $S/D = 1,8$ dengan bervariasi rasio posisi silinder pengganggu dalam arah tegak lurus dengan

arah datangnya angin terhadap diameter turbin y/D sebesar 0, 0,25, dan 0,5 pada bilangan Reynolds=9000, 145000, dan 178000.

1.2 Perumusan Masalah

Turbin Savonius merupakan turbin angin dengan sumbu vertikal yang terbuat dari sebuah silinder yang dibagi menjadi dua bagian kemudian disatukan dibagian tengahnya. Turbin ini memiliki dua buah sudu, dimana sudu yang memiliki permukaan cekung terhadap arah aliran disebut dengan *advancing blade*, sedangkan sudu yang lain memiliki permukaan yang cembung terhadap aliran yang disebut dengan *returning blade*. Setiap sudu pada turbin angina Savonius memilki gaya hambat. Semakin besar perbedaan gaya hambat pada kedua sudu, semakin besar pula torsi yang memutar turbin. Semakin besar torsi, maka semakin besar pula daya yang dihasilkan. Berdasarkan penelitian-penelitian terdahulu, peningkatan performa turbin dapat dilakukan dengan meletakkan pengganggu di depan turbin.

Hipotesa awal yang diharapkan dari penelitian adalah sebagai berikut.

1. Penempatan pengganggu berupa silinder di depan *returning blade* diduga dapat menyebabkan tekanan di daerah antara silinder pengganggu dan *returning blade* akan menurun, sedangkan tekanan di belakang *returning blade* diasumsikan sama seperti tidak menggunakan silinder pengganggu. Sehingga *pressure drag* yang mengakibatkan selisih tekanan antara di depan dan di belakang *returning blade* menurun. Akibatnya gaya *drag* pada *returning blade* menurun dan menyebabkan selisih gaya *drag* antara *returning blade* dan *advancing blade* semakin besar. Hal ini akan menghasilkan torsi semakin besar, *coefficient of power* juga meningkat.
2. Penempatan pengganggu berupa silinder di depan *returning blade* diduga dapat mengganggu *boundary layer* pada *returning blade* dengan mempercepat transisi

aliran dari laminar ke turbulen sehingga titik separasi pada *returning blade* dapat ditunda dan daerah *wake* dibelakang *returning blade* semakin kecil. Semakin kecil *wake* yang dihasilkan, maka gaya hambat pada *returning blade* semakin kecil, sehingga perbedaan gaya hambat pada *advancing blade* dan *returning blade* semakin besar, torsi yang dihasilkan juga besar. Akibatnya, *coefficient of power* yang dihasilkan juga semakin besar.

3. Variasi rasio posisi silinder pengganggu dalam arah tegak lurus dengan arah datangnya angin terhadap diameter sudu turbin Savonius (y/D) sebesar 0, 0,25, dan 0,5 bertujuan untuk mendapatkan posisi optimum dimana *wake* yang dihasilkan oleh silinder pengganggu dapat secara efektif menunda titik separasi dari *returning blade* sejauh mungkin ketika turbin berputar dan secara efektif menurunkan *pressure drag* dari *returning blade*, nilai gaya *drag returning blade* semakin kecil dan selisih gaya *drag* kedua sudu akan semakin meningkat. Disisi lain, silinder pengganggu pada posisi (y/D) diduga dapat lebih banyak mengarahkan aliran udara menuju sisi *advancing blade*. Akibatnya gaya *drag* pada sisi *advancing blade* akan meningkat seiring dengan pergeseran posisi y menuju *advancing blade* hingga mencapai posisi optimumnya. Setelah posisi y melewati jarak optimumnya, akan terjadi peningkatan gaya drag pada sisi *returning blade* dan selisih gaya *drag* pada kedua sudu akan menurun. Sehingga nilai torsi, daya, dan *coefficient of power* yang dihasilkan turbin Savonius akan meningkat hingga jarak y optimum, kemudian turun seiring pertambahan jarak y .

Untuk membuktikan hipotesa tersebut, dilakukan penelitian dengan menempatkan silinder pengganggu di depan *returning blade* yang berukuran d/D sebesar 0,5 pada jarak S/D

sebesar 1,8 dengan bervariasi jarak y/D sebesar 0,0; 0,25; dan 0,5 serta bilangan Reynolds 97000; 145000; dan 178000.

1.3 Tujuan

Tujuan dari penelitian dengan menggunakan silinder pengganggu yang berukuran d/D sebesar 0,5 dengan jarak S/D sebesar 1,8 dari turbin adalah untuk meningkatkan performa turbin Savonius dan mengetahui pengaruh variasi jarak y/D sebesar 0,0; 0,25; dan 0,5 serta bilangan Reynolds 97000; 145000; dan 178000 dengan cara:

1. Mengukur putaran turbin angin Savonius saat diberi aliran udara.
2. Mengukur torsi dinamis turbin angin Savonius saat diberi aliran udara.
3. Mengukur torsi statis turbin angin Savonius saat diberi aliran udara.
4. Menghitung *coefficient of power* turbin angin Savonius saat diberi aliran udara.
5. Menghitung *coefficient of moment* turbin angin Savonius saat diberi aliran udara.

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Aliran udara diasumsikan *steady, uniform* dan *incompressible*.
2. Analisa *external flow*.
3. Aliran yang digunakan hanya satu arah.
4. Perpindahan panas yang terjadi diabaikan.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Dapat menambah pengetahuan tentang pengaruh pemberian silinder pengganggu terhadap nilai torsi statis, *coefficient of moment* dan *coefficient of power* turbin Savonius dengan variasi posisi silinder penghalang dalam arah tegak lurus dengan arah datangnya angin dan bilangan Reynolds.
2. Sebagai bahan referensi bagi mahasiswa lainnya dalam melakukan penelitian selanjutnya.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Turbin Angin

Angin merupakan salah satu sumber energi terbarukan. Jika dibandingkan dengan sumber energi lainnya, energi angin menghasilkan efek yang sedikit terhadap lingkungan. Turbin angin tidak menghasilkan emisi yang bisa mencemari udara atau air. Turbin angin juga dapat mengurangi jumlah pembangkit listrik dari bahan bakar fosil, yang menghasilkan polusi udara dan emisi karbon dioksida yang lebih rendah. Orang menggunakan energi angin untuk menggerakkan kapal di sepanjang Sungai Nil pada awal 5.000 SM. Pada tahun 200 SM, pompa air bertenaga angin sederhana digunakan di China, dan kincir angin dengan pisau tenunan anyaman menggiling gandum di Persia dan Timur Tengah. Di Indonesia, rata-rata kecepatan angin tergolong rendah yaitu antara 4,0-5,0 m/s dapat dimanfaatkan sebagai pembangkit listrik yang mampu menghasilkan daya sebesar 970 MW, namun sampai tahun 2013 penggunaan energi angin hanya 1.96 MW.

Turbin angin menggunakan baling-baling untuk mengumpulkan energi kinetik angin. Angin mengalir melalui baling-baling dan menciptakan *lift* (mirip dengan efek pada sayap pesawat) yang menyebabkan baling-baling berputar. Baling-baling dihubungkan ke poros penggerak yang mengubah generator listrik untuk menghasilkan listrik. Ukuran turbin angin sangat bervariasi. Panjang baling-baling adalah faktor terbesar dalam menentukan jumlah listrik yang bisa dihasilkan turbin angin. Turbin angin kecil yang bisa menggerakkan satu rumah mungkin memiliki kapasitas pembangkit listrik 10 kilowatt (kW). Turbin terbesar memiliki kapasitas pembangkit 5.000 kW sampai 8.000 kW. Dalam perkembangannya, turbin angin dibagi menjadi 2 (dua) tipe yaitu *horizontal axis wind turbine* dan *vertical axis wind turbine*.

2.1.1 *Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT)*

Turbin angin horizontal saat ini telah dimodernisasi dari desain kincir angin tradisional yang telah ada sejak berabad-abad. Turbin ini memiliki sumbu poros horizontal sesuai dengan namanya. *Horizontal axis wind turbine* memiliki komponen utama yaitu poros, generator listrik, *gearbox* untuk meningkatkan kecepatan putaran sudu dan sudu turbin dengan kekekakuan tertentu. Bentuk baling-baling turbin tipe ini seperti propeller pada pesawat karena memiliki efisiensi aerodinamis yang baik dan biasanya memiliki tiga buah bilah. *Horizontal axis wind turbine* terbesar memiliki tinggi setara dengan bangunan bertingkat 20 dan panjang bilah hingga 100 feet. Semakin tinggi turbin dengan semakin panjang bilah akan menghasilkan listrik yang semakin besar pula.

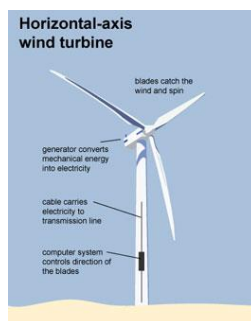
Saat ini, tipe *horizontal axis wind turbine* lebih banyak digunakan. Keuntungan dari tipe turbin angin sumbu horizontal antara lain variabel *pitch of blade* yang mampu menyimpan jumlah energi angin dengan maksimal, memiliki efisiensi yang tinggi karena letak sudu yang tegak lurus dengan arah angin sehingga turbin menerima daya yang besar untuk berputar, dan memiliki desain konvensional, mudah dalam instalasi dan perawatan. Meskipun banyak digunakan karena efisiensi yang tinggi, HAWT memiliki kekurangan seperti pengoperasian turbin yang kurang baik saat kondisi angin yang tidak stabil atau arah angin yang tidak menentu.

2.1.2 *Vertical Axis Wind Turbine (VAWT)*

Vertical axis wind turbine memiliki sudu yang menempel pada bagian atas dan bawah rotor vertikal. Secara umum terdapat 2 (dua) jenis VAWT yaitu Savonius dan Darrieus. Savonius memiliki fungsi mirip dengan roda air yang memanfaatkan gaya hambat, sedangkan Darrieus menggunakan fungsi sudu seperti sudu yang digunakan pada HAWT. Turbin

angin Darrieus pertama kali dipatenkan pada tahun 1931 dimana turbin ini memiliki efisiensi tertinggi untuk jenis VAWT namun memiliki torsi *self starting* yang rendah. VAWT biasanya digunakan dekat dengan tanah sehingga memiliki keuntungan dalam menempatkan *gearbox* atau generator. Tetapi, udara yang mengalir rendah dekat dengan tanah menyebabkan daya yang dibangkitkan oleh turbin juga rendah.

VAWT memiliki keunggulan jika dibandingkan HAWT antara lain mampu memanfaatkan angin dari segala arah, tidak membutuhkan banyak angin untuk menghasilkan daya, serta tidak menghasilkan suara yang bising. Tetapi, VAWT memiliki kekurangan yaitu kemampuan *self starting* yang rendah. Perbedaan antara HAWT dan VAWT dapat dilihat pada tabel 2.1.



Gambar 2.1 *Horizontal Axis Wind Turbine (National Energy Education Development Project)*



Gambar 2.2 *Darrieus Vertical Axis Wind Turbine (Lysippos, Wikimedia commons author)*

Tabel 2.1 Perbedaan HAWT dan VAWT (Mahmood,2012).

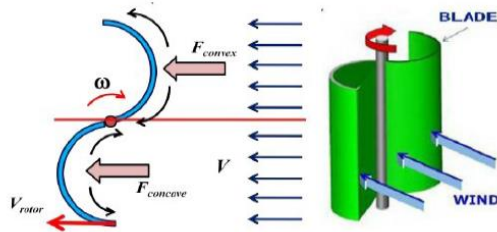
	HAWT	VAWT
<i>Self starting</i>	Tinggi	Rendah
Bentuk keseluruhan	Kompleks	Sederhana
Lokasi generator	Tidak di tanah	Di tanah
Tinggi dari tanah	Besar	Kecil
Ruang operasi <i>blade</i>	Besar	Kecil
Produksi suara	Relatif tinggi	Rendah
Arah angin	Berpengaruh	Tidak berpengaruh

2.2 Turbin Angin Savonius

Turbin angin Savonius diklasifikasikan kedalam VAWT dimana memiliki konstruksi yang sederhana dan dapat beroperasi tanpa bergantung dengan arah angin, serta dapat berputar pada kecepatan angin yang rendah. Turbin angin pertama kali dikembangkan oleh S.J. Savonius pada tahun 1920. Sehingga banyak dilakukan penelitian untuk meningkatkan efisiensinya seperti penambahan jumlah sudu, ukuran *blade gap* maupun *overlap ratio*. Turbin angin Savonius memiliki bentuk setengah

silinder yang terpasang berlawanan pada sumbu vertikal (membentuk huruf S) dan beroperasi karena adanya gaya hambat pada turbin. Turbin ini memiliki dua buah sudu, cekung dan cembung. Sudu cekung disebut dengan *returning blade*, sedangkan sudu cembung disebut dengan *advancing blade*.

Ketika angin bertiup kearah turbin, maka akan terjadi gaya hambat dikedua sudu dengan arah yang berlawanan. Perbedaan gaya hambat antara kedua sudu mampu menghasilkan torsi sehingga turbin dapat berputar. Dengan adanya torsi dan kecepatan angular turbin, maka dihasilkan daya dari turbin.

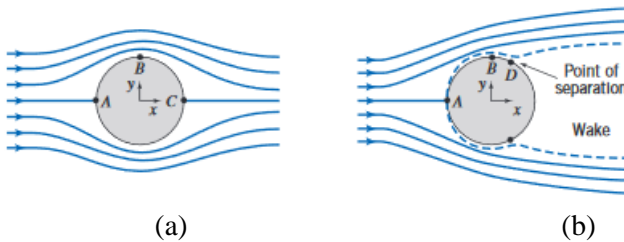


Gambar 2.3 Turbin Savonius dengan dua sudu (Frederikus et al, 2014).

2.3 Aliran melalui Silinder

Suatu aliran yang melewati suatu benda akan membentuk *streamline* dimana arahnya tegak lurus dengan arah alirannya. Ketika suatu aliran *inviscid* dan *incompressible* melintasi bola maka akan membentuk *streamline* yang simetris antara bagian dan belakang bola seperti pada gambar 2.4(a). Karena *mass flow* antara dua *streamline* adalah konstan, dimana *streamline* membuka, kecepatan akan berkurang. Sehingga kecepatan pada titik A dan C relatif rendah, sedangkan di titik B lebih tinggi. Pada kenyataannya, aliran akan diberhentikan ketika sampai pada titik A dan C yang disebut dengan titik stagnasi. Pada titik A dan C yang berkecepatan rendah memiliki tekanan yang

tinggi, begitu pula pada titik B yang berkecepatan tinggi sehingga memiliki tekanan yang rendah. Distribusi tekanan pada bagian depan dan belakang adalah simetris sehingga tidak ada gaya *drag* yang diakibatkan oleh tekanan, begitu pula pada aliran *inviscid* tidak ada gaya drag akibat gaya gesek.



Gambar 2.4 (a) Aliran *inviscid*, (b) Aliran *viscous* (Fox, 2011).

Pada aliran *viscous* dimana tegangan geser berpengaruh terhadap perubahan kecepatan aliran menyebabkan adanya *boundary layer*. Dengan adanya *boundary layer*, maka gaya drag dapat dihasilkan, tetapi dapat menyebabkan terjadinya wake seperti pada gambar 2.4(b). Titik D merupakan titik separasi, dimana partikel fluida didorong keluar oleh objek dan menyebabkan *wake* berkembang. Ketika fluida mengalir dari titik B ke titik C dimana titik B memiliki tekanan lebih kecil dibanding titik C dapat menyebabkan terjadinya *adverse pressure gradient* (tekanan mengubah arah gerak fluida) dimana partikel fluida bergerak secara pelan ke bagian belakang bola. Selain itu, partikel juga bergerak secara pelan di *boundary layer* karena adanya gaya gesek. Akhirnya, partikel fluida diam dan terdorong ke arah bola oleh partikel lain sehingga terbentuk *wake* pada bagian belakang. *Wake* memiliki tekanan yang relatif rendah, sedangkan tekanan pada bagian depan bola relatif tinggi sehingga terjadi *pressure drag* yang lebih besar.

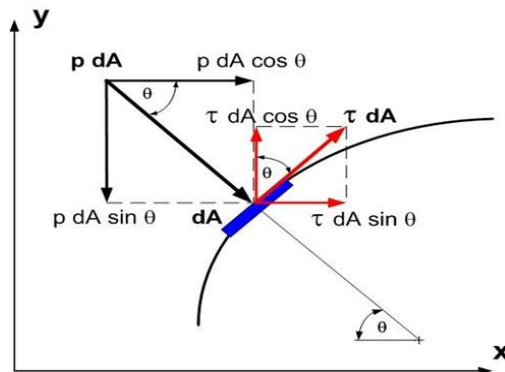
2.4 Gaya Hambat

Gaya hambat (*drag*) adalah komponen gaya yang bekerja sejajar dengan arah kecepatan aliran. Gaya hambat terjadi karena adanya pergesekan dengan fluida sekitar dimana terjadi pada kondisi aliran *viscous* dan *incompressible*. Sedangkan gaya angkat (*lift*) adalah komponen gaya yang bekerja tegak lurus dengan arah kecepatan aliran. Gaya hambat yang terjadi dapat berupa *skin friction drag* (F_{Df}), yaitu gaya hambat yang menyinggung permukaan secara tangensial yang timbul sebagai akibat adanya viskositas (tegangan geser antara fluida dan permukaan benda) ataupun terjadi berupa *pressure drag* (F_{Dp}) yaitu gaya hambat yang tegak lurus terhadap permukaan benda yang timbul karena adanya tekanan fluida. Resultan antara *skin friction drag* dan *pressure drag* disebut sebagai *total drag* seperti terlihat di gambar 2.5.

Dari skema sederhana pada ilustrasi gambar diatas, gaya hambat yang terbentuk dapat didefinisikan sebagai berikut :

$$F_D = F_{Dp} + F_{Df} \dots \dots \dots (2.1)$$

$$F_D = \int \cos \theta \cdot (p \cdot dA) + \int \sin \theta \cdot (\tau \cdot dA) \dots \dots \dots (2.2)$$



Gambar 2.5 Skema sederhana gaya *drag* dan *lift* (Retno Dewi, 2016).

Gaya hambat ditunjukkan dengan suatu bilangan tak berdimensi yang biasa disebut sebagai koefisien *drag* (C_D). Oleh karena itu dapat disimpulkan persamaan untuk mengetahui gaya *drag* ini adalah:

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho \cdot U^2 \cdot A} \dots\dots\dots (2.3)$$

$$F_D = C_D \cdot \frac{1}{2} \rho \cdot V^2 \cdot A \dots\dots\dots (2.4)$$

dimana :

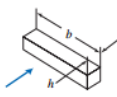






A : Luas permukaan benda (m^2)

F_D : Gaya *Drag* (Newton)

$\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2$: Tekanan dinamis aliran bebas

Sedangkan nilai koefisien *drag* C_D pada berbagai macam permukaan dapat dilihat pada tabel 2.2.

Tabel 2.2 Data koefisien *drag* C_D pada berbagai macam permukaan ($Re \geq 103$) (Fox, 2011)

Object	Diagram	$C_D (Re \geq 10^3)$
Square prism		$b/h = \infty$ 2.05
		$b/h = 1$ 1.05
Disk		1.17
Ring		1.20 ^b
Hemisphere (open end facing flow)		1.42
Hemisphere (open end facing downstream)		0.38
C-section (open side facing flow)		2.30
C-section (open side facing downstream)		1.20

^aData from Hoerner [16].
^bBased on ring area.

2.5 Bilangan Reynolds

Bilangan Reynolds adalah bilangan tak berdimensi yang digunakan untuk menentukan apakah suatu aliran laminar atau turbulen. Bilangan Reynolds dikemukakan oleh Osborne Reynolds pada tahun 1883 dirumuskan sebagai berikut.

$$Re = \frac{\rho v L}{\mu} \dots\dots\dots(2.5)$$

Dimana ρ dan μ merupakan densitas dan viskositas fluida yang mengalir, v merupakan kecepatan fluida dan L adalah panjang karakteristik benda. Pada aliran internal, suatu aliran dikatakan turbulen ketika bilangan Reynolds lebih dari 4400, transisi antara 2300-4400, dan laminar kurang dari 2300. Pada aliran eksternal, suatu aliran dikatakan turbulen ketika bilangan Reynolds lebih dari 5×10^5 , sedangkan laminar untuk bilangan Reynolds kurang dari 5×10^5 .

Pada penelitian ini, panjang karakteristik (L) turbin angin Savonius didapatkan dari persamaan sebagai berikut.

$$L = 2D - b \dots\dots\dots(2.6)$$

dimana D merupakan diameter sudu turbin dan b merupakan diameter poros.

2.6 Tip Speed Ratio

Tip speed ratio (λ) merupakan parameter yang menghubungkan kecepatan angin dengan diameter rotor. Sebagai perbandingan antara kecepatan pada ujung *blade* dengan kecepatan angin yang melalui *blade*, λ dapat dinyatakan sebagai

$$\lambda = \frac{V_{rotor}}{V} = \frac{\omega r}{V} \dots\dots\dots(2.7)$$

dimana

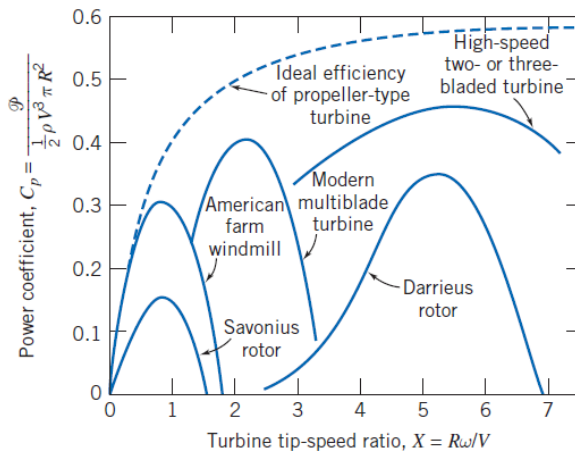
λ = *tip speed ratio*

ω = kecepatan sudut turbin (rad/s)

r = jari-jari turbin (m)

V = kecepatan angin (m/s)

Setiap turbin angin memiliki karakter tersendiri mengenai hubungan antara *tip speed ratio* dengan *coefficient of power*. Batas teoritis *coefficient of power* adalah 0,59 untuk *non-ducted turbine* yang dikenal dengan Betz Limit sebagaimana dapat dilihat pada gambar 2.6. Pada Savonius rotor, nilai C_p maksimum mendekati 0,2 dengan nilai λ antara 0,7-0,8.



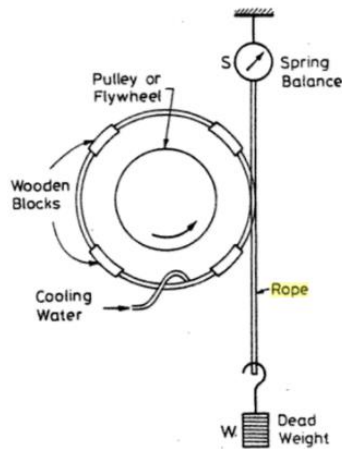
Gambar 2.6 Grafik hubungan *coefficient of power* turbin angin dengan *tip speed ratio* (Fox, 2011)

2.7 Rope Brake Dynamometer

Gambar 2.7 menunjukkan bahwa *rope brake dynamometer* terdiri tali yang diikat melingkari tepi katrol yang terpasang pada poros yang dayanya akan diukur. Bagian ujung atas tali dipasang *spring balance* (s) sedangkan pada bagian ujung bawah tali dihubungkan dengan pemberat (M). Untuk pengukuran daya dilakukan pada kecepatan konstan dimana pada kondisi tersebut, torsi yang ditransmisikan oleh poros harus sama dengan torsi akibat gaya gesek tali. Sehingga, dapat dirumuskan sebagai berikut.

$$P = (s - M) \times g \times R \times \omega \dots \dots \dots (2.8)$$

Dimana P	= daya poros (Watt)
M	= massa beban (kg)
s	= massa pegas (kg)
g	= gravitasi bumi (m/s^2)
R	= jari-jari poros (m)
ω	= putaran poros (rad/s)



Gambar 2.7 Mekanisme *rope brake dynamometer* (Brar, 2004).

2.8 *Coefficient of Power dan Coefficient of Moment*

Dari pengukuran torsi dinamis dan kecepatan putaran turbin angin Savonius, daya turbin dapat diperoleh dari masing-masing kecepatan angin sebagai:

$$P_{out} = T\omega \text{ (Watt)} \dots\dots\dots(2.9)$$

dimana T merupakan torsi dinamis dan ω adalah kecepatan angular dari turbin. Kecepatan angular dapat didefinisikan dalam rad/s sebagai:

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} \dots\dots\dots(2.10)$$

dimana n merupakan kecepatan putaran poros turbin dalam rpm.

Torsi dinamis diperoleh dalam Nm dari

$$T = Fr \dots\dots\dots(2.11)$$

dimana r adalah radius dari turbin angin Savonius. Gaya yang bekerja pada poros turbin diperoleh dalam N.

Coefficient of power (CoP) dapat ditentukan dengan persamaan sebagai berikut.

$$CoP = \frac{P_{out}}{P_{in}} \dots\dots\dots(2.12)$$

dimana P_{in} dihitung dari persamaan berikut.

$$P_{in} = \frac{1}{2} \rho A V^3 \dots\dots\dots(2.13)$$

ρ merupakan massa jenis udara dalam kg/m^3 , A adalah luas proyeksi turbin dalam m^2 , dan V merupakan kecepatan angin dalam m/s. Sehingga *coefficient of power* dapat dirumuskan sebagai:

$$CoP = \frac{T\omega}{\frac{1}{2}\rho A V^3} \dots\dots\dots(2.14)$$

Sedangkan untuk menentukan *coefficient of moment* menggunakan persamaan sebagai berikut.

$$C_m = \frac{T}{\frac{1}{2}\rho A V^2 r} \dots\dots\dots(2.15)$$

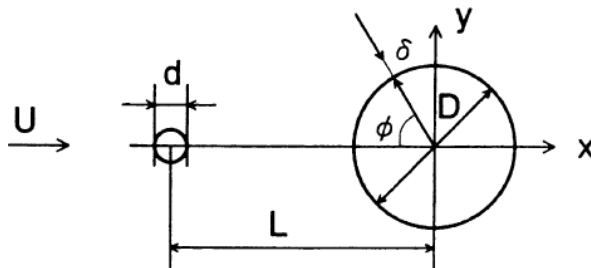
2.9 Penelitian Terdahulu

Dalam melakukan penelitian, dibutuhkan referensi dari penelitian-penelitian terdahulu yang berkaitan dengan penelitian yang dilakukan. Beberapa penelitian yang mendukung penelitian turbin angin Savonius antara lain penelitian tentang pengurangan gaya hambat pada silinder sirkular oleh Tsutsui et al, pengurangan gaya hambat dengan pemberian silinder pengganggu tipe I oleh Triyogi et al, penelitian tentang peningkatan performa turbin angin Savonius dengan plat penghalang oleh Altan et al, penelitian tentang peningkatan performa turbin angin Savonius oleh Mahmoud et al, penelitian tentang peningkatan performa turbin angin Savonius dengan penghalang silinder sirkular didepan *returning blade* oleh Pradhito et al dan penelitian tentang

peningkatan performa turbin angin Savonius akibat pengaruh lebar plat pengganggu oleh Triyogi et al.

2.9.1 Pengurangan Gaya Hambat Sebuah Silinder Sirkular pada Aliran Udara

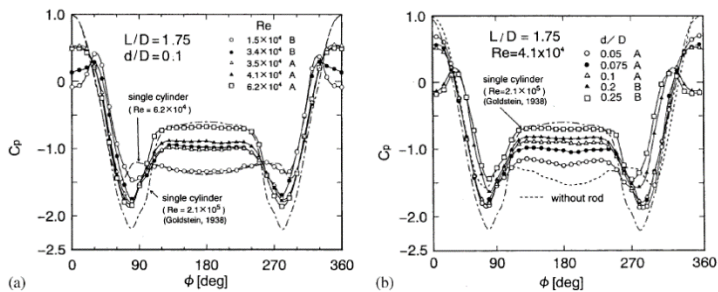
Penelitian yang dilakukan oleh **Tsutsui et al (2002)** yang bertujuan untuk mengurangi gaya hambat pada sebuah silinder sirkular dengan menempatkan silinder pengganggu di depan silinder sirkular pada sebuah *low speed windtunnel* dengan dimensi tinggi 400 mm, panjang 800 mm dan lebar 150 mm. Penelitian ini menggunakan silinder sirkular dengan diameter 40 mm dan bervariasi diameter silinder pengganggu sebesar 1 sampai 10 mm serta variasi jarak pusat pengganggu terhadap pusat silinder sirkular sejauh 50 sampai dengan 120 mm. Kecepatan *freestream* yang digunakan bervariasi dari 4 sampai dengan 24 m/s dengan bilangan Reynolds sebesar $1,5 \times 10^4$ sampai $6,2 \times 10^4$. Skema penelitian yang dilakukan untuk penelitian ini seperti pada gambar 2.8.



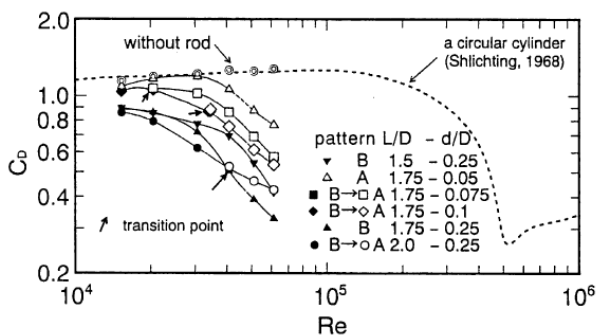
Gambar 2.8 Skema Penelitian (Tsutsui et al, 2002)

Distribusi tekanan pada silinder sirkular yang dihasilkan dari penelitian Goldstein seperti pada gambar 2.9 (a) dengan variasi bilangan Reynolds pada $L/D=1,75$, $d/D=0,1$ menunjukkan perubahan pola aliran dari B ke A sekitar bilangan $Re=(3,4-3,5) \times 10^4$. Pola aliran A, nilai *pressure coefficient* C_p pada bagian depan silinder berkurang sebesar 0,5 dengan berkurangnya

kecepatan yang mengenai silinder. Pada pola aliran B nilai C_p di depan silinder didapatkan nilai negatif disebabkan karena adanya *quasi-static vortex* yang terbentuk diantara silinder pengganggu dan silinder sirkular dan C_p menghasilkan nilai maksimum sebesar 0,2-0,5 pada daerah *reattachment* dimana *shear layer* terlepas dari silinder pengganggu. Pada gambar 2.9 (b) ditunjukkan efek silinder pengganggu pada distribusi tekanan pada $L/D=1,75$ dan bilangan Reynolds = $4,1 \times 10^4$. Pada $d/D \leq 0,05$ untuk pola aliran A dan $d/D \geq 0,075$ untuk pola aliran B, C_p meningkat seiring dengan meningkatnya d/D .



Gambar 2.9 Distribusi tekanan sekitar silinder pengganggu
(a) Efek bilangan Reynolds (b) Efek d/D (Tsutsui et al, 2002)



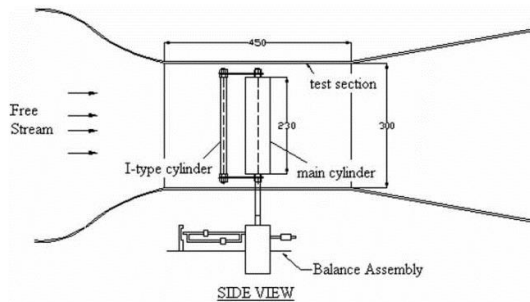
Gambar 2.10 Grafik drag coefficient terhadap bilangan Reynolds (Tsutsui, 2002)

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa semakin besar bilangan Reynolds maka nilai *drag coefficient* silinder sirkular semakin rendah dimana hal ini terlihat pada bilangan Reynolds lebih dari 3×10^4 seperti pada gambar 2.10. Penurunan *drag coefficient* terlihat mirip dengan penurunan *drag coefficient* akibat turbulensi pada *freestream* atau akibat dari peningkatan kekasaran permukaan benda yang dapat menyebabkan transisi. Pengurangan *drag coefficient* disebabkan oleh penurunan tekanan di depan silinder sirkular dan bergesernya titik separasi silinder sirkular. Berdasarkan gambar 2.10 menunjukkan bahwa pola B lebih efektif mengurangi *drag coefficient* dibandingkan pola A. Kondisi optimum pengurangan *drag coefficient* pada $d/D = 0,25$, $L/D = 2,0$ pada $Re < 4,1 \times 10^4$ dan $d/D = 0,25$; $L/D = 1,75$ untuk $Re \geq 4,1 \times 10^4$ pada pola B. Nilai C_D pada $d/D = 0,25$, $L/D = 1,75$, $Re = 6,2 \times 10^4$ adalah 0,33 dimana pengurangan *drag coefficient* sekitar 73% dibandingkan dengan silinder sirkular tanpa pengganggu.

2.9.2 Pengurangan Gaya Hambat pada Silinder Sirkular dengan Menggunakan Silinder Pengganggu Tipe I

Penelitian yang dilakukan oleh **Triyogi et al (2009)** bertujuan untuk mengurangi gaya hambat pada silinder sirkular dengan menempatkan silinder pengganggu tipe I seperti pada gambar 2.11. Silinder pengganggu ini mempengaruhi distribusi tekanan pada silinder utama dengan *shear layer* serta memperbesar daerah *wake* sehingga mampu mengubah titik separasi dan mengurangi gaya hambat pada silinder utama. Penelitian ini menggunakan diameter silinder (d) sebesar 60 mm dan tujuh buah potongan *bluff body* dari diameter silinder pengganggu (d_s) sebesar 7,5 mm dengan sudut potong 0° , 10° , 20° , 30° , 45° , 53° , dan 65° . Silinder pengganggu ditempatkan tegak lurus dengan arah aliran dengan rasio S/d sebesar 1,375. penelitian dilakukan didalam *wind tunnel* dengan kecepatan angin konstan 14 m/s dan bilangan Reynolds $5,3 \times 10^4$.

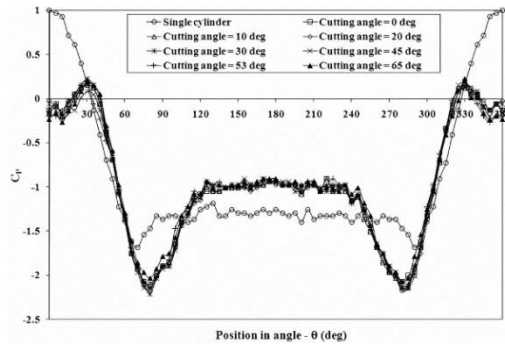
Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa distribusi *pressure coefficient* C_p adalah simetris untuk semua silinder pengganggu. Nilai C_p untuk bagian depan mendekati 0 atau bernilai negatif sedangkan nilai maksimum C_p sebesar 0,1-0,2 pada *reattachment region* dimana *shear layer* terseparasi dari silinder pengganggu. Posisi *reattachment region* terletak pada $\theta = 30^\circ$ (bagian atas) dan $\theta = 330^\circ$ (bagian bawah). Untuk sudut potong $\theta_s = 53^\circ$, dihasilkan nilai CoP terendah yaitu -2,14 pada posisi $\theta = 80^\circ$ (bagian atas) dan $\theta = 280^\circ$ (bagian bawah). Pemberian silinder pengganggu mampu menunda terjadinya separasi pada bagian atas dan bawah silinder utama.



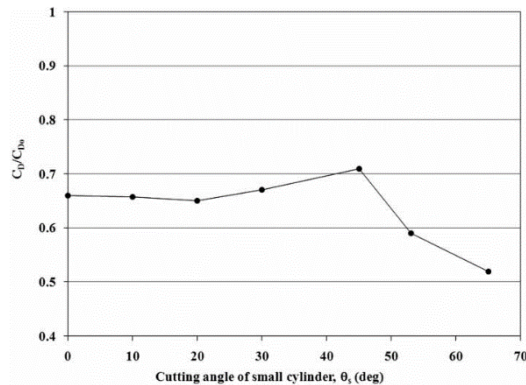
Gambar 2.11 Skema penelitian tampak samping (Triyogi et al,2009)

Gambar 2.13 menunjukkan pengaruh variasi sudut potong terhadap rasio koefisien *drag* dengan dan tanpa silinder pengganggu (C_D/C_{D0}) dimana hasil penelitian menunjukkan bahwa silinder sirkular dengan silinder pengganggu memiliki koefisien *drag* yang lebih kecil dibanding dengan silinder sirkular tanpa silinder pengganggu atau $C_D/C_{D0} < 1$. Pada sudut potong $\theta_s = 65^\circ$ menunjukkan pengurangan gaya *drag* paling tinggi dengan perbedaan maksimum sebesar 14% terhadap $\theta_s = 0^\circ$, sedangkan sudut potong $\theta_s = 45^\circ$ menunjukkan pengurangan gaya *drag* paling rendah.

Dari penelitian tersebut dapat disimpulkan bahwa silinder pengganggu tipe I pada sudut potong $\theta_s = 65^\circ$ mampu mengurangi gaya *drag* secara efektif dimana besar gaya *drag* pada sudut potong tersebut sebesar 0,52 kali dari silinder sirkular tanpa pengganggu.



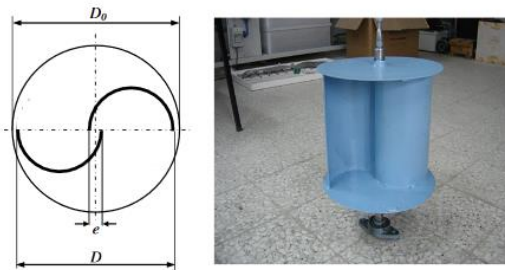
Gambar 2.12 Distribusi koefisien tekanan pada silinder sirkular dengan variasi sudut potong pada $Re=5,3 \times 10^4$ (Triyogi et al,2009).



Gambar 2.13 Variasi sudut potong silinder pengganggu terhadap perbandingan C_D/C_{D0} pada $Re=5,3 \times 10^4$ (Triyogi et al,2009).

2.9.3 Studi Eksperimen Peningkatan Performa Turbin Angin Savonius dengan Pemberian Plat Penghalang.

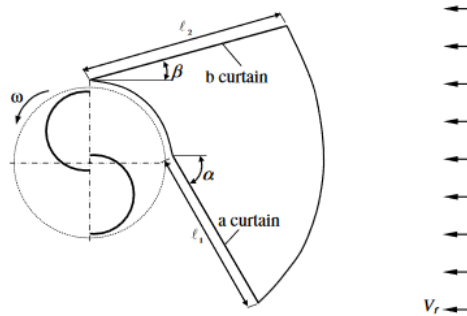
Penelitian yang dilakukan oleh Altan et al (2008) bertujuan untuk meningkatkan performa turbin angin Savonius dengan menempatkan plat penghalang didepan turbin untuk mencegah torsi negatif yang menyebabkan turbin berputar kearah berlawanan. Penelitian ini dilakukan dengan membandingkan turbin dengan dan tanpa plat penghalang. Pada penelitian ini, nilai *rasio overlap* (e/d) yang digunakan sebesar 0,15 karena nilai ini merupakan nilai optimum hasil dari penelitian sebelumnya. Geometri dari turbin angin Savonius seperti pada gambar 2.14 dengan diameter dan tinggi sebesar 32 cm, nilai optimum overlap rasio (e/d) sebesar 0,15 sehingga jarak gap (e) sebesar 2,6 cm. Ketebalan *blade* yang digunakan sebesar 2 mm dengan diameter plat (D_o) 0,1 kali lebih besar dari diameter turbin yaitu 35,2 cm. Turbin ini dilengkapi dengan *ball bearing* pada bagian atas dan bawah turbin untuk meminimalisir gaya gesek.



Gambar 2.14 Parameter geometris turbin angin Savonius (Altan et al, 2008).

Terdapat dua buah plat yang ditempatkan di depan turbin yaitu plat a dan b dimana pengaturan plat penghalang ditunjukkan pada gambar 2.15. Panjang plat penghalang sebesar l_1 dan l_2 dengan sudut masing-masing α dan β . Variasi panjang yang digunakan pada penelitian ini ditunjukkan pada tabel 2.3 dengan

variasi sudut α mulai dari 30° hingga 60° , sedangkan sudut β mulai dari 0° sampai 30° .

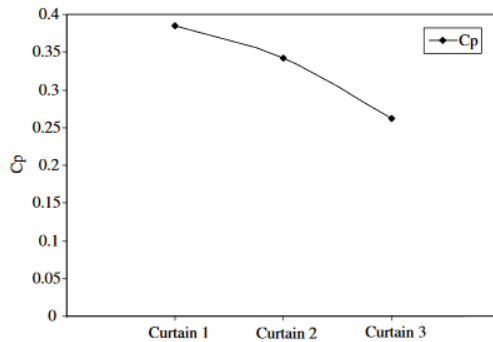


Gambar 2.15 Parameter geometris plat penghalang (Altan et al, 2008).

Tabel 2.3 Variasi dimensi plat penghalang (Altan et al, 2008).

Type of curtain arrangement	Distance ℓ_1 (cm)	Distance ℓ_2 (cm)
Curtain 1	45	52
Curtain 2	34	39
Curtain 3	22	26

Dari penelitian tersebut, didapatkan hasil maksimum *coefficient of power* dari masing-masing plat penghalang, dimana besarnya ditunjukkan pada tabel 2.4. Dari gambar 2.16, *curtain 1* menunjukkan maksimum *coefficient of power* terbesar dibandingkan dengan plat penghalang lain.



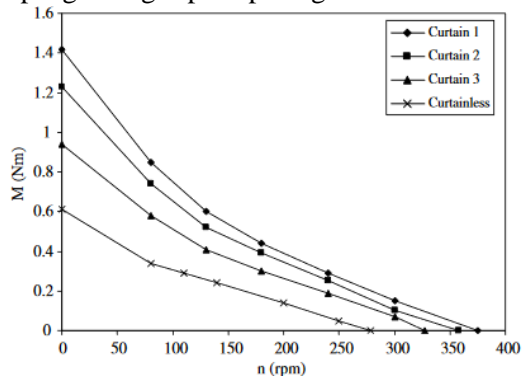
Gambar 2.16 Efek panjang plat penghalang terhadap maksimum *coefficient of power* (Altan et al, 2008).

Tabel 2.4 Maksimum *coefficient of power* hasil eksperimen (Altan et al, 2008).

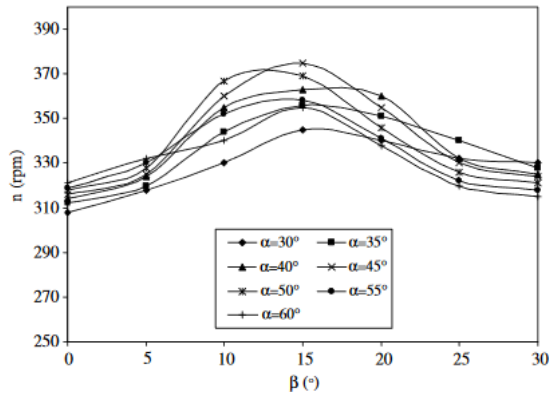
Type of curtain arrangement	C_p
Curtain 1	0.38533
Curtain 2	0.34154
Curtain 3	0.26273

Penelitian dengan variasi sudut α dan β dilakukan pada *curtain 1* karena memiliki maksimum *coefficient of power* terbesar. Hasil menunjukkan bahwa ketika sudut β dibawah 15° ($\beta < 15^\circ$), putaran rotor menjadi rendah begitu pula ketika $\beta > 15^\circ$ putaran rotor menurun. Berdasarkan gambar 2.17 putaran maksimal diperoleh ketika sudut $\alpha = 45^\circ$ dan $\beta = 15^\circ$. Dibandingkan dengan turbin konvensional, turbin dengan plat penghalang menghasilkan torsi yang lebih besar. Berdasarkan gambar 2.18, torsi terbesar terjadi ketika panjang plat penghalang l_1 sebesar 45 cm dan l_2 sebesar 52 cm (*curtain 1*). Dari penelitian tersebut, dapat disimpulkan bahwa turbin angin Savonius dengan plat penghalang memiliki *coefficient*

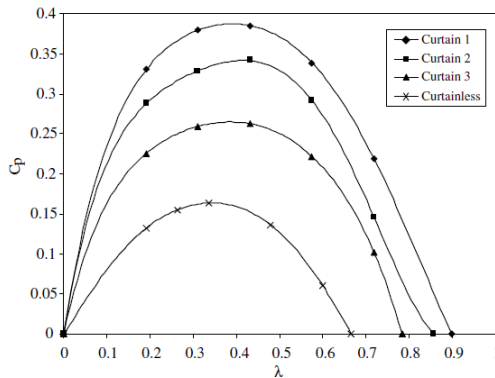
of power (CoP) lebih tinggi jika dibandingkan dengan turbin angin tanpa plat penghalang seperti pada gambar 2.19.



Gambar 2.17 Efek putaran terhadap sudut plat penghalang pada curtain 1 (Altan et al, 2008).



Gambar 2.18 Grafik efek torsi terhadap putaran turbin (Altan et al, 2008).



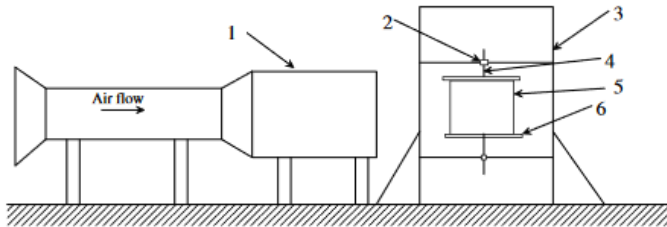
Gambar 2.19 Grafik hubungan antara *coefficient of power* dan *tip speed ratio* (Altan et al, 2008).

2.9.4 Studi Eksperimen Peningkatan Performa Turbin Angin Savonius

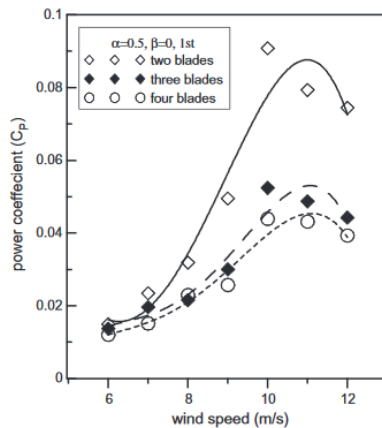
Penelitian yang dilakukan oleh **Mahmoud et al (2012)** bertujuan untuk meningkatkan performa turbin angin Savonius dengan membandingkan beberapa parameter seperti jumlah sudu turbin, penggunaan *end plate*, tingkatan pada turbin dan *overlap ratio*. Penelitian ini dilakukan di dalam *subsonic wind tunnel* dengan jarak antara turbin dengan *exit wind tunnel* sebesar 125 cm. *Wind tunnel* yang digunakan berdiameter 49 cm dengan kecepatan antara 0 hingga 13 m/s. *Blade* yang dibuat berasal dari PVC dengan beberapa diameter yaitu 0,3, 0,2, 0,1, dan 0,08 m. Diameter *endplate* yang digunakan 10% lebih besar dari diameter turbin karena dapat menghasilkan performa yang lebih bagus berdasarkan pada penelitian sebelumnya. Poros yang digunakan berdiameter 14 mm dengan panjang 62 cm.

Dengan variasi banyaknya jumlah sudu pada *aspect ratio* 0,5 dan *overlap ratio* 0 untuk *single stage rotor*, hasil menunjukkan bahwa turbin dengan dua sudu memiliki *coefficient of power* yang lebih besar dengan turbin bersudu tiga atau empat seperti pada gambar 2.21. Hal ini dapat disebabkan oleh perbedaan gaya *drag*

pada turbin dua sudu lebih besar sehingga menghasilkan daya yang besar pula.



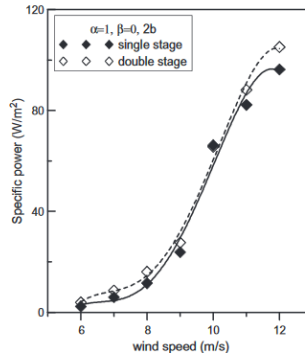
Gambar 2.20 Skema penelitian (1) *wind tunnel* (2) *bearing* (3) *steel housing* (4) *steel shaft* (5) *blades* dan (6) *endplate* (Mahmoud et al, 2012).



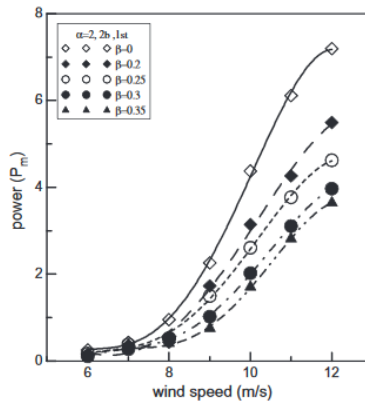
Gambar 2.21 Hubungan antara *coefficient of power* dengan kecepatan angin dengan variasi jumlah *blade* (Mahmoud et al, 2012).

Variasi banyaknya tingkat turbin menunjukkan hasil bahwa *double stage rotor* memiliki *specific power* yang lebih tinggi dibandingkan dengan *single stage rotor* seperti pada gambar

2.22. Dengan variasi overlap antara 0 hingga 0,35 menunjukkan hasil bahwa turbin tanpa overlap menghasilkan daya yang lebih tinggi dibandingkan dengan turbin dengan overlap seperti pada gambar 2.23.

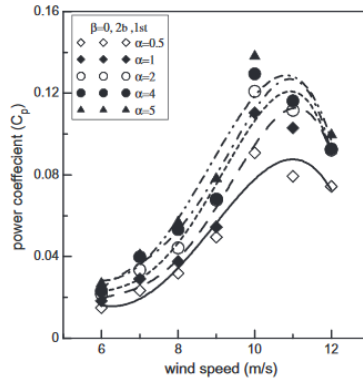


Gambar 2.22 Grafik hubungan antara *specific power* dengan kecepatan angin dengan variasi tingkat turbin (Mahmoud et al, 2012).

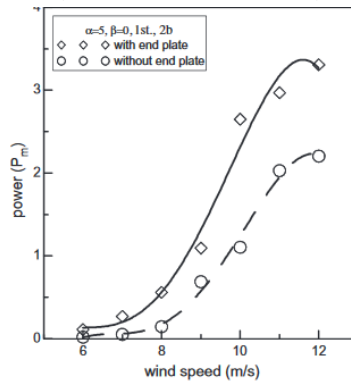


Gambar 2.23 Grafik hubungan antara daya dengan kecepatan angin dengan variasi *overlap ratio* (Mahmoud et al, 2012).

Dari hasil penelitian, peningkatan *aspect ratio* turbin dapat meningkatkan *coefficient of power* seperti pada gambar 2.24 sedangkan turbin dengan *endplate* menghasilkan *coefficient of power* lebih besar dibanding tanpa *endplate* seperti pada gambar 2.25. Dengan adanya *endplate* menyebabkan lebih banyak udara mengarah ke sudu turbin.



Gambar 2.24 Grafik hubungan antara *coefficient of power* dengan kecepatan angin dengan variasi *aspect ratio* (Mahmoud et al, 2012).



Gambar 2.25 Grafik hubungan antara daya dengan kecepatan angin dengan variasi ada tidaknya *endplate* (Mahmoud et al, 2012)

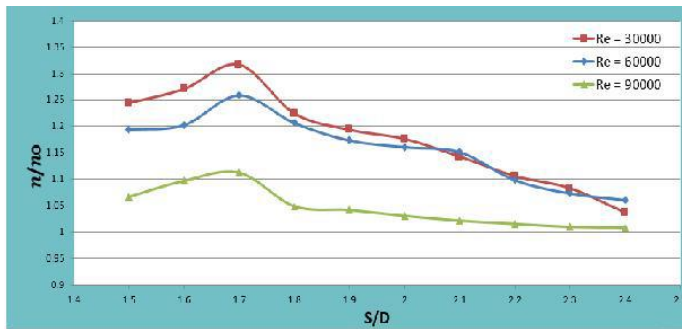
2.9.5 Studi Eksperimen Peningkatan Performa Turbin Angin Savonius dengan Pemberian Silinder Pengganggu.

Penelitian yang dilakukan oleh **Pradhito (2016)** bertujuan untuk meningkatkan performa turbin angin Savonius dengan meletakkan silinder pengganggu di depan *returning blade*. Penelitian ini menggunakan *blower* sebagai penghasil sumber angin dimana turbin angin Savonius yang digunakan memiliki dua sudu dengan diameter sudu (D) 101.6 mm, tinggi (H) 300 mm, diameter turbin 190.2 mm dan diameter poros (e) 13 mm. Silinder pengganggu yang digunakan berdiameter (d) 50,8 mm dan tinggi 500 mm. Penelitian ini menggunakan variasi jarak S/D antara 1,5 – 2,4 dan menggunakan bilangan Reynolds sebesar 30000, 60000, dan 90000.

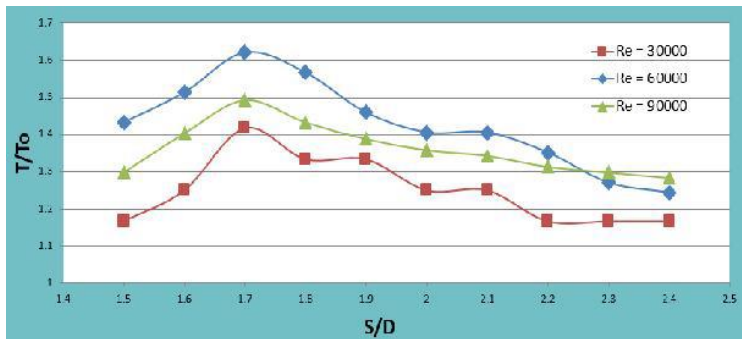
Hasil penelitian menunjukkan bahwa variasi jarak S/D berpengaruh secara efektif terhadap performa turbin angin Savonius. Pada gambar 2.26, bilangan Reynolds $Re = 30000$ menghasilkan perbandingan putaran dengan dan tanpa penghalang (n/n_0) lebih tinggi jika dibandingkan dengan variasi bilangan Reynolds yang lain serta nilai tertinggi didapatkan pada jarak S/D = 1,7 dengan nilai maksimum peningkatan putaran sebesar 1,32 kali.

Sedangkan pada gambar 2.27 menunjukkan bilangan Reynolds = 60000 menghasilkan perbandingan torsi statis dengan dan tanpa penghalang (T/T_0) lebih tinggi jika dibandingkan dengan variasi bilangan Reynolds yang lain serta nilai tertinggi didapatkan pada jarak S/D = 1,7 dengan nilai maksimum peningkatan torsi statis sebesar 1,62 kali. Penurunan torsi statis yang terjadi dikarenakan jarak yang dekat akan mengakibatkan *shear layer* dari silinder pengganggu akan efektif mengganggu *boundary layer* dari sudu *returning blade* turbin Savonius sedangkan semakin jauh

jarak maka *shear layer* tersebut tidak lagi efektif mengganggu *boundary layer* pada *returning blade*.



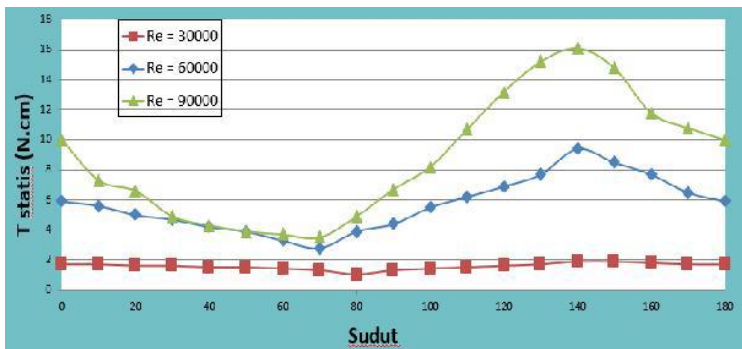
Gambar 2.26 Grafik perbandingan putaran antara turbin angin Savonius berpengganggu dan tanpa silinder pengganggu (n/n_0) sebagai fungsi jarak pada $S/D = 1,4 - 2,4$ (Pradhito, 2016)



Gambar 2.27 Grafik perbandingan torsi statis antara turbin angin Savonius berpengganggu dan tanpa silinder pengganggu (T/T_0) sebagai fungsi jarak pada $S/D = 1,4 - 2,4$ (Pradhito, 2016)

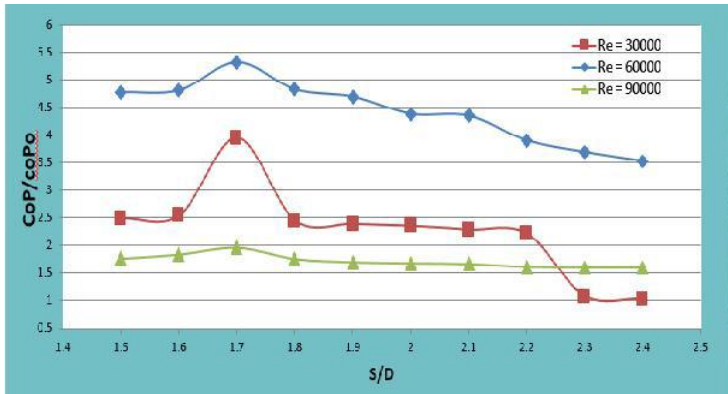
Pada gambar 2.28 menunjukkan bahwa pada bilangan Reynolds=90000 menghasilkan torsi statis yang paling besar dibandingkan dengan bilangan Reynolds=30000 dan 60000 dimana pada sudut 0° sampai dengan 70° nilai torsi statis

mengalami penurunan. Sedangkan pada sudut 70° sampai dengan sudut 140° nilai torsi statis mengalami kenaikan. Dari sudut 140° sampai dengan 180° nilai dari torsi statis ini kembali menurun, dimana pada titik 180° memiliki nilai yang sama dengan bukaan sudut 0° . Perubahan posisi sudu mempengaruhi koefisien *drag* untuk tiap sudu. *Advancing blade* dengan koefisien *drag* yang lebih besar akan memberikan gaya dorong yang lebih besar dibandingkan dengan *returning blade*. Momentum masing-masing sudu saling berlawanan, sehingga nilai torsi statis terbesar dan terkecil akan didapat pada posisi sudut tertentu.



Gambar 2.28 Grafik torsi statis turbin angin Savonius berpengganggu (T) sebagai fungsi sudut (θ) pada jarak $S/D=1,7$ (Pradhito, 2016).

Pada gambar 2.29 menunjukkan bilangan Reynolds = 60000 menghasilkan perbandingan *coefficient of power* dengan dan tanpa pengganggu (CoP/CoP_0) lebih tinggi jika dibandingkan dengan variasi bilangan Reynolds yang lain serta nilai tertinggi didapatkan pada jarak $S/D = 1,7$ dengan nilai maksimum peningkatan *coefficient of power* sebesar 5,31 kali.



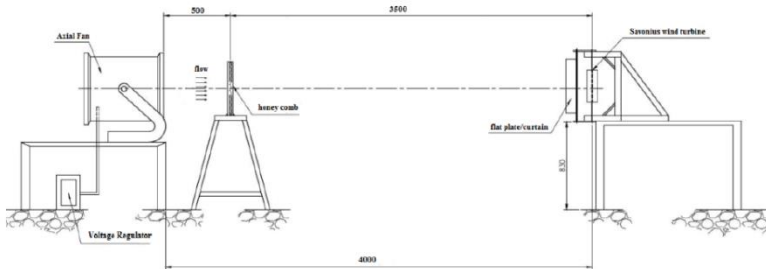
Gambar 2.29 Grafik perbandingan *coefficient of power* antara turbin angin Savonius berpengganggu dan tanpa silinder pengganggu ($CoP/CoPo$) sebagai fungsi jarak pada $S/D = 1,4 - 2,4$ (Pradhito, 2016)

2.9.6 Efek Lebar Plat Penghalang Terhadap Performa Turbin Angin Savonius

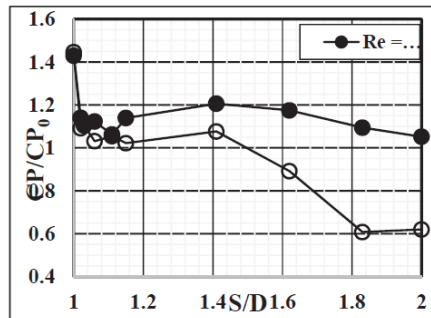
Penelitian yang dilakukan oleh **Triyogi (2018)** bertujuan untuk meningkatkan performa turbin angin Savonius dengan meletakkan plat penghalang di depan *returning blade*. Penelitian ini menggunakan *axial fan* pada jarak 4000 mm di depan turbin angin Savonius sebagai penghasil sumber angin dimana turbin angin Savonius yang digunakan terbuat dari pipa PVC dan memiliki dua sudu dengan diameter sudu (D) 102 mm, tinggi (H) 300 mm dan diameter poros (e) 16 mm. Plat penghalang yang digunakan terbuat dari plastik PVC dengan ketebalan 3 mm dan tinggi 300 mm. Penelitian ini menggunakan variasi lebar $S/D = 1,00; 1,02; 1,03; 1,06; 1,11; 1,15; 1,41; 1,62; 1,83$; dan 2,00 dan menggunakan bilangan Reynolds sebesar 30000 dan 90000 dengan skema penelitian seperti pada gambar 2.30.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa variasi plat penghalang pada bilangan Reynolds 30000 mampu meningkatkan

performa turbin angin Savonius seperti pada gambar 2.31. Hal ini ditunjukkan dengan nilai perbandingan $CoP/CoPo > 1$. Berbeda pada bilangan Reynolds 90000, variasi lebar plat penghalang tidak selalu meningkatkan performa turbin angin Savonius. Pada $S/D > 1,4$ menunjukkan penurunan performa turbin angin Savonius.



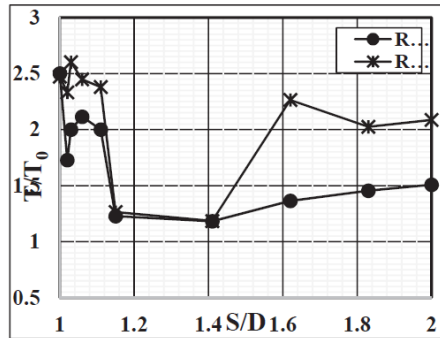
Gambar 2.30 Skema Penelitian (Triyogi,2018)



Gambar 2.31 Grafik perbandingan $CoP/CoPo$ terhadap fungsi S/D pada $Re=30000$ dan 90000 (Triyogi,2018)

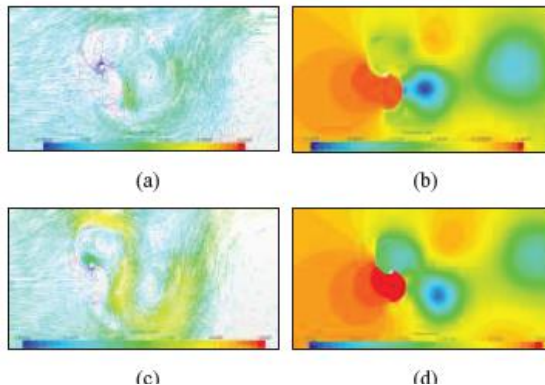
Berdasarkan gambar 2.32 menunjukkan bahwa pemberian plat penghalang lebih efektif meningkatkan torsi statis turbin angin Savonius jika dibandingkan turbin tanpa plat penghalang. Hal ini ditunjukkan dengan nilai $T/To > 1$, pada $S/D = 1$ sampai $1,02$ nilai T/To menurun, selanjutnya $S/D=1,02$ sampai

1,06 nilai T/T_0 meningkat dan terjadi penurunan nilai T/T_0 pada $S/D=1,06$ sampai 1,41.

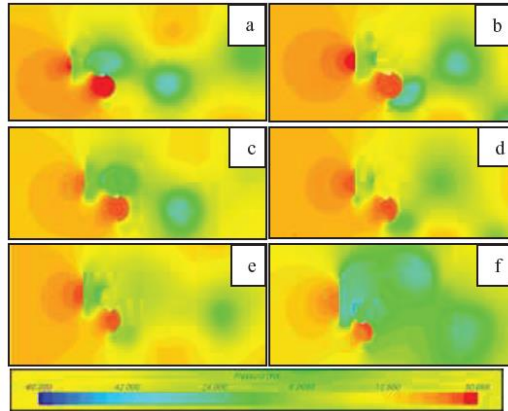


Gambar 2.32 Grafik Perbandingan T/T_0 terhadap fungsi S/D pada $Re=30000$ dan 90000 (Triyogi,2018)

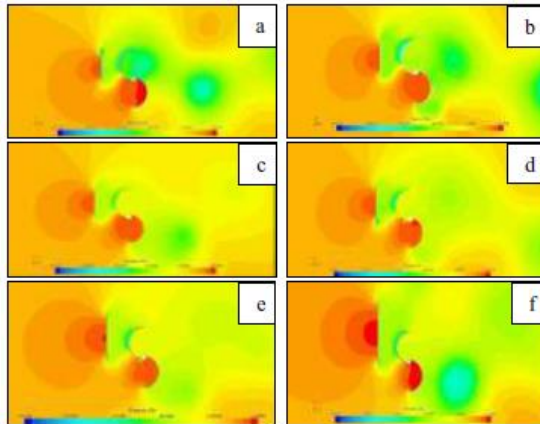
Berdasarkan penelitian Triyogi (2018) tentang peningkatan performa turbin angin Savonius dengan variasi lebar plat penghalang secara numerik pada kondisi diam dengan menggunakan STAR CCM++ menunjukkan hasil seperti pada gambar 2.34 dan 2.35.



Gambar 2.33 Aliran di sekitar turbin angin Savonius pada $Re=30000$: (a) vektor kecepatan (b) kontur tekanan; $Re=90000$: (c) vektor kecepatan (d) kontur tekanan (Triyogi,2018)



Gambar 2.34 Kontur tekanan turbin angin Savonius dengan plat penghalang untuk $Re=30000$: (a) $S/D=1,00$, (b) $S/D=1,02$, (c) $S/D=1,03$, (d) $S/D=1,15$, (e) $S/D=1,41$ dan (f) $S/D=2,00$.



Gambar 2.35 Kontur tekanan turbin angin Savonius dengan plat penghalang untuk $Re=90000$: (a) $S/D=1,00$, (b) $S/D=1,02$, (c) $S/D=1,03$, (d) $S/D=1,15$, (e) $S/D=1,41$ dan (f) $S/D=2,00$ (Triyogi,2018)

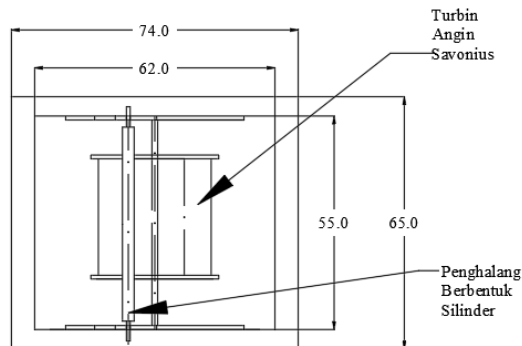
Berdasarkan perbandingan kontur tekanan turbin dengan dan tanpa plat penghalang terlihat bahwa dengan turbin dengan plat penghalang menunjukkan pengurangan tekanan pada sisi *returning blade* sehingga *pressure drag* pada sisi *returning blade* semakin berkurang sedangkan tekanan pada sisi *advancing blade* relatif sama akibatnya torsi statis akan semakin meningkat sehingga dapat disimpulkan bahwa pemberian plat penghalang di depan *returning blade* mampu meningkatkan performa turbin angin Savonius.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

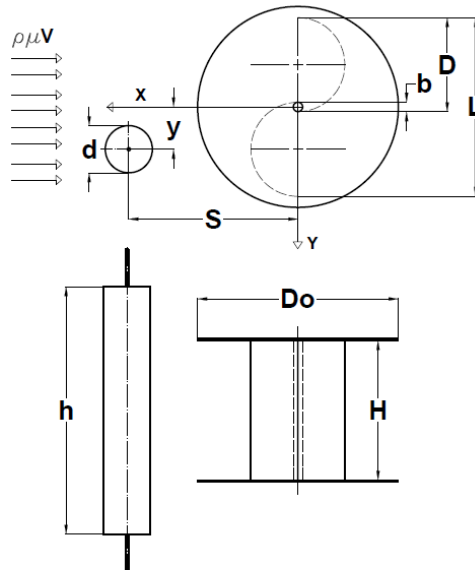
BAB III METODE PENELITIAN

3.1 Analisa Dimensi

Pada suatu penelitian diperlukan analisa dimensi untuk mengetahui parameter-parameter yang dapat mempengaruhi suatu penelitian. Parameter-parameter tersebut antara lain densitas fluida, viskositas fluida, kecepatan fluida, diameter silinder pengganggu, diameter turbin, tinggi turbin, panjang silinder pengganggu, jarak antara *returning blade* dan silinder pengganggu, jarak antara pusat silinder pengganggu dengan pusat turbin, putaran sudu, dan diameter poros. Skema penelitian dan parameter-parameter pengujian dapat dilihat pada gambar 3.2.



Gambar 3.1 Susunan penyangga dan turbin angin Savonius tampak depan.



Gambar 3.2 Skema penelitian dan parameter-parameter pengujian.

dimana;

- D : diameter sudu Turbin Savonius (m)
- S : jarak antara pusat silinder pengganggu dengan pusat *returning blade*
- y : posisi silinder pengganggu dalam arah tegak lurus dengan arah datangnya angin
- d : diameter silinder pengganggu (m)
- b : diameter poros (m)
- L : Diameter turbin (m)
- V : kecepatan aliran (m/s)
- ρ : massa jenis udara (kg/m^3)
- μ : viskositas fluida (Ns/m^2)
- h : panjang silinder pengganggu (m)
- H : tinggi turbin (m)
- ω : putaran sudu (rpm)

3.3.1 Analisa Dimensi untuk *Coefficient of Power*

Metode yang digunakan dalam analisa dimensi *coefficient of power* adalah *Buckingham Phi Theorem*. Langkah-langkah dalam analisa dimensi *coefficient of power* adalah sebagai berikut.

1. Menentukan parameter-parameter yang mempengaruhi *power*

$$P = f(\rho, \mu, V, D, d, S, y, H, h, b, \omega)$$

Jumlah parameter (n) = 12 parameter

Parameter-parameter tersebut adalah:

$$P = \text{Power (J/s)}$$

ρ = Massa jenis udara (kg/m^3)

$$\mu = \text{Viskositas udara (Ns/m}^2\text{)}$$

V = Kecepatan aliran (m/s)

D = Diameter sudu turbin angin *Savonius* (m)

d = Diameter silinder pengganggu (m)

S = Jarak antara pusat silinder pengganggu dengan pusat *returning blade*

y = posisi silinder pengganggu dalam arah tegak lurus dengan arah datangnya angin

$$H = \text{Tinggi turbin angin Savonius (m)}$$

h = Panjang silinder pengganggu (m)

b = Diameter poros (m)

$$\omega = \text{Putaran sudu turbin angin Savonius (rpm)}$$

- Menentukan satu grup dimensi primer yang digunakan dalam menganalisis.

Dipilih M, L, t .

3. Membuat dimensi primer dari parameter-parameter yang dipilih.

[illegible]

4. Memilih parameter berulang yang jumlahnya (m) sama dengan jumlah dimensi primer (r) yang digunakan yaitu : ρ, V, D .
Jumlah parameter berulang (m) = r = 3.
5. Menentukan grup tanpa dimensi yang akan dihasilkan.
Jumlah grup tanpa dimensi yang akan dihasilkan = n-m = 12 - 3 = 9 grup tanpa dimensi.

$$\text{i. } \pi_1 = \rho^a V^b D^c P = \left(\frac{M}{L^3}\right)^a \left(\frac{L}{t}\right)^b (L)^c \left(\frac{M L^2}{t^3}\right) = (M^0 L^0 t^0)$$

dimana :

$$M : a + 1 = 0$$

$$L : -3a + b + c + 2 = 0$$

$$t : -b - 3 = 0$$

diperoleh :

$$a = -1 ; b = -3 ; c = -2$$

sehingga :

$$\pi_1 = \rho^{-1} V^{-3} D^{-2} P$$

atau

$$\pi_1 = \frac{P}{\rho V^3 D^2}$$

- ii. Dengan cara yang sama diperoleh:

$$\pi_2 = \frac{\mu}{\rho V D}$$

$$\pi_3 = \frac{d}{D}$$

$$\pi_4 = \frac{S}{D}$$

$$\pi_5 = \frac{y}{D}$$

$$\pi_6 = \frac{H}{D}$$

$$\pi_7 = \frac{h}{D}$$

$$\pi_8 = \frac{b}{D}$$

$$\pi_9 = \frac{\omega D}{V}$$

Dari analisis dimensi diatas diperoleh grup tak berdimensi sebagai berikut :

π_1 : *Coefficient of Power*

π_2 : Bilangan Reynolds

π_3 : Rasio diameter silinder pengganggu dengan diameter turbin angina Savonius

π_4 : Rasio jarak antara pusat *returning blade* dengan silinder pengganggu

π_5 : Rasio jarak antara pusat turbin dengan silinder pengganggu

π_6 : *Aspect ratio*

π_7 : Rasio panjang silinder pengganggu dengan diameter turbin angin Savonius

π_8 : Rasio diameter *overlap* dengan diameter turbin angin Savonius

π_9 : *Tip speed ratio*

Hubungan antara grup tak berdimensi sebagai berikut :

$$\pi_1 = f(\pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5, \pi_6, \pi_7, \pi_8, \pi_9)$$

$$\frac{P}{\rho V^3 D^2} = f_1\left(\frac{\mu}{\rho V D}, \frac{d}{D}, \frac{S}{D}, \frac{y}{D}, \frac{H}{D}, \frac{h}{D}, \frac{b}{D}, \frac{\omega D}{V}\right)$$

Pada penelitian ini $\frac{d}{D}, \frac{S}{D}, \frac{H}{D}, \frac{h}{D}, \frac{b}{D}$ sebagai variabel tetap, sedangkan $\frac{\mu}{\rho V D}, \frac{y}{D}, \frac{\omega D}{V}$ divariasikan agar dapat mengetahui seberapa besar pengaruhnya terhadap *Coefficient of Power* pada turbin angin sehingga :

$$\frac{P}{\rho V^3 D^2} = f_2\left(\frac{\mu}{\rho V D}, \frac{y}{D}, \frac{\omega D}{V}\right)$$

Dalam hal ini D sebanding dengan L, untuk $L = 2D-b$, maka

$$\frac{P}{\rho V^3 D^2} = f_3 \left(\frac{\mu}{\rho V D}, \frac{y}{D}, \frac{\omega D}{V} \right)$$

atau

$$CoP = f_4 \left(Re, \frac{y}{D}, \lambda \right)$$

3.3.1 Analisa Dimensi untuk *Coefficient of Moment*

Metode yang digunakan dalam analisa dimensi *coefficient of moment* adalah *Buckingham Phi Theorem*. Langkah-langkah dalam analisa dimensi *coefficient of moment* adalah sebagai berikut.

1. Menentukan parameter-parameter yang mempengaruhi *torsi*

$$T = f(\rho, \mu, V, D, d, S, y, H, h, b, \omega)$$

Jumlah parameter (n) = 12 parameter

Parameter-parameter tersebut adalah:

T = Torsi (Nm)

ρ = Massa jenis udara (kg/m^3)

μ = Viskositas udara (Ns/m^2)

V = Kecepatan aliran (m/s)

D = Diameter sudu turbin angin *Savonius* (m)

d = Diameter silinder pengganggu (m)

S = Jarak antara pusat silinder pengganggu dengan pusat *returning blade*

y = posisi silinder pengganggu dalam arah tegak lurus dengan arah datangnya angin

H = Tinggi turbin angin *Savonius* (m)

h = Panjang silinder pengganggu (m)

b = Diameter poros (m)

ω = Putaran sudu turbin angin *Savonius* (rpm)

2. Menentukan satu grup dimensi primer yang digunakan dalam menganalisis.

Dipilih M, L, t.

3. Membuat dimensi primer dari parameter-parameter yang dipilih.

Parameter	T	ρ	μ	V	D	d	S	y	H	h	b	ω
Dimensi	$\frac{M L^2}{t^2}$	$\frac{M}{L^3}$	$\frac{M}{L t}$	$\frac{L}{t}$	L	L	L	L	L	L	L	$\frac{1}{t}$

4. Memilih parameter berulang yang jumlahnya (m) sama dengan jumlah dimensi primer (r) yang digunakan yaitu : ρ, V, D .

Jumlah parameter berulang (m) = $r = 3$.

5. Menentukan grup tanpa dimensi yang akan dihasilkan.
Jumlah grup tanpa dimensi yang akan dihasilkan = $n - m$
= $12 - 3 = 9$ grup tanpa dimensi.

$$i. \quad \pi_1 = \rho^a V^b D^c T = \left(\frac{M}{L^3}\right)^a \left(\frac{L}{t}\right)^b (L)^c \left(\frac{M L^2}{t^2}\right) = (M^0 L^0 t^0)$$

dimana :

$$M : a + 1 = 0$$

$$L : -3a + b + c + 2 = 0$$

$$t : -b - 2 = 0$$

diperoleh :

$$a = -1 ; b = -2 ; c = -3$$

sehingga :

$$\pi_1 = \rho^{-1} V^{-2} D^{-3} T$$

atau

$$\pi_1 = \frac{T}{\rho V^2 D^3}$$

- ii. Dengan cara yang sama diperoleh:

$$\pi_2 = \frac{\mu}{\rho V D}$$

$$\pi_3 = \frac{d}{D}$$

$$\pi_4 = \frac{S}{D}$$

$$\pi_5 = \frac{y}{D}$$

$$\pi_6 = \frac{H}{D}$$

$$\pi_7 = \frac{h}{D}$$

$$\pi_8 = \frac{b}{D}$$

$$\pi_9 = \frac{\omega D}{V}$$

Dari analisis dimensi diatas diperoleh grup tak berdimensi sebagai berikut :

π_1 : *Coefficient of Moment*

π_2 : Bilangan Reynolds

π_3 : Rasio diameter silinder pengganggu dengan diameter turbin angin Savonius

π_4 : Rasio jarak antara pusat *returning blade* dengan silinder pengganggu

π_5 : Rasio jarak antara pusat turbin dengan silinder pengganggu

π_6 : *Aspect ratio*

π_7 : Rasio panjang silinder pengganggu dengan diameter turbin angin Savonius

π_8 : Rasio diameter *overlap* dengan diameter turbin angin Savonius

π_9 : *Tip speed ratio*

Hubungan antara grup tak berdimensi sebagai berikut :

$$\pi_1 = f(\pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5, \pi_6, \pi_7, \pi_8, \pi_9)$$

$$\frac{T}{\rho V^2 D^3} = f_1\left(\frac{\mu}{\rho V D}, \frac{d}{D}, \frac{S}{D}, \frac{y}{D}, \frac{H}{D}, \frac{h}{D}, \frac{b}{D}, \frac{\omega D}{V}\right)$$

Pada penelitian ini $\frac{d}{D}, \frac{S}{D}, \frac{H}{D}, \frac{h}{D}, \frac{b}{D}$ sebagai variabel tetap, sedangkan $\frac{\mu}{\rho V D}, \frac{y}{D}, \frac{\omega D}{V}$ divariasikan agar dapat mengetahui seberapa besar pengaruhnya terhadap *Coefficient of Moment* pada turbin angin sehingga :

$$\frac{T}{\rho V^2 D^3} = f_2 \left(\frac{\mu}{\rho V D}, \frac{y}{D}, \frac{\omega D}{V} \right)$$

Dalam hal ini D sebanding dengan L, untuk $L = 2D$ -b, maka

$$\frac{T}{\rho V^2 D^3} = f_3 \left(\frac{\mu}{\rho V D}, \frac{y}{D}, \frac{\omega D}{V} \right)$$

atau

$$C_m = f_4 \left(Re, \frac{y}{D}, \lambda \right)$$

3.2 Peralatan

Pada penelitian ini digunakan peralatan untuk menunjang pengambilan data. Berikut peralatan yang digunakan adalah sebagai berikut.

3.2.1 *Axial Fan*

Penelitian ini menggunakan *axial fan* sebagai penghasil sumber aliran udara. *Axial fan* yang digunakan yaitu **CKE SPV-18**. Untuk spesifikasi lebih detail dapat dilihat pada tabel 3.1

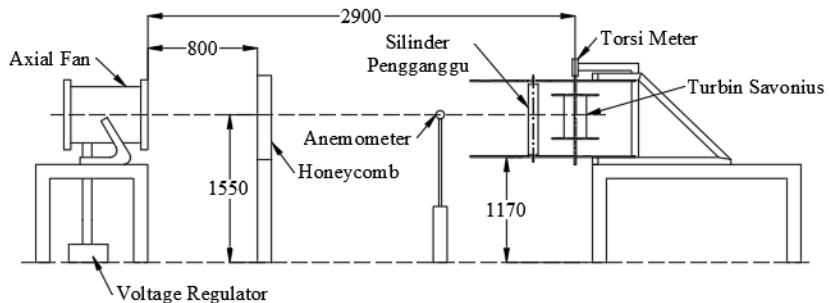


Gambar 3.3 *Axial fan* SPV-18.

Tabel 3.1 Spesifikasi *axial fan* CKE SPV-18

SPECIFICATIONS	
Diameter	18 inch / 450 mm
Speed	2850 RPM
Air Flow	4413 CFM
Power	1700 Watt
Static Press	520 Pa
Phase	1
Voltage	220 – 240 V

Skema penelitian yang dilakukan adalah dengan meletakkan *axial fan* sejauh 2900 mm di depan turbin angin Savonius, yang dapat dilihat pada gambar 3.4.

**Gambar 3.4** Skema penelitian (mm)

3.2.2 Benda Uji

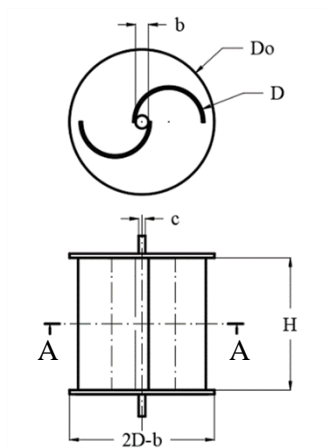
Pada penelitian ini, sebagai benda kerja digunakan turbin angin Savonius dengan pengganggu berupa silinder sirkular.

a. Profil turbin angin Savonius sebagai berikut :

- Diameter sudu turbin (D) : 165,2 mm
- Tebal sudu turbin : 4 mm
- Tinggi (H) : 294,4 mm

- Diameter turbin ($2D-b$) : 303,4 mm
- Diameter poros (b) : 19 mm
- Diameter *end plate* (D_o) : 321 mm
- Tebal *end plate* : 1,3 mm
- Material sudu : PVC
- Material *end plate* : Aluminium cladding 2024
- Momen Inersia : $0,0355 \text{ kg/m}^2$

Potongan A-A



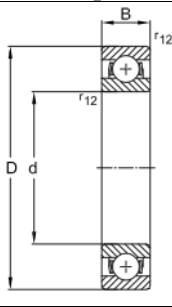
Gambar 3.5 Dimensi turbin angin Savonius (mm)

Pada penelitian ini menggunakan bantalan **IBC GERMANY 6201 THBP** dengan tipe Single Row Deep Groove Ball Bearing seperti pada gambar 3.6 dengan spesifikasi pada tabel 3.2.



Gambar 3.6 IBC GERMANY 6201 THBP Bearing

Tabel 3.2 Spesifikasi IBC GERMANY 6201 THBP Bearing

	Basic designation	6201
	D (mm)	32
	d (mm)	12
	B (mm)	10
	Berat (kg)	0,037

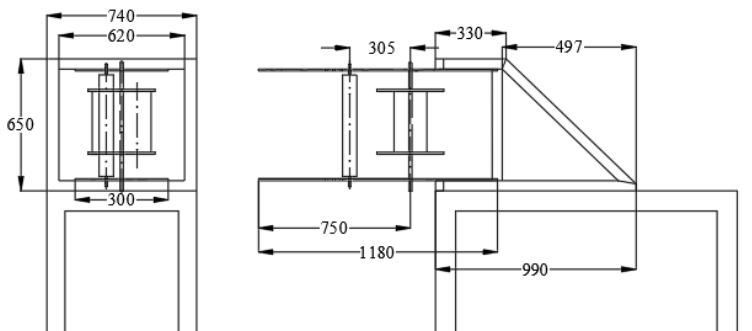
- b. Profil silinder sirkular pengganggu sebagai berikut :
- d/D : 0,5
 - Diameter (d) : 88,8 mm
 - Tinggi (h) : 500 mm
 - S/D : 1,80



Gambar 3.7 Dimensi silinder pengganggu (mm)

3.2.3 Penyangga Turbin Angin Savonius

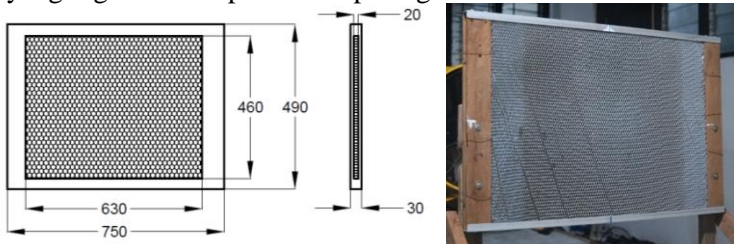
Pada penelitian digunakan sebuah penyangga yang digunakan sebagai tempat peletakkan turbin angin Savonius dan juga silinder pengganggu. Berikut skema dari penyangga turbin angin Savonius sebagaimana ditunjukkan pada gambar 3.8.



Gambar 3.8 Dimensi penyangga turbin angin Savonius (mm)

3.2.4 *Honeycomb*

Honeycomb merupakan alat yang digunakan untuk menyearahkan angin dari *axial fan* ke turbin dengan menghilangkan *swirl*. Berdasarkan penelitian **Loehrke dan Nagib**, rasio minimum panjang sel dengan diameter sel adalah 6 atau 8. Pada penelitian ini menggunakan *honeycomb* yang berukuran 630 mm x 460 mm dan panjang sel sebesar 20 mm dengan ukuran meshing 0,0248/mm² bentuk sel *hexagonal*. Skema *honeycomb* yang digunakan dapat dilihat pada gambar 3.8.



Gambar 3.9 *Honeycomb*

3.2.5 *Voltage Regulator*

Voltage regulator merupakan alat yang mempunyai fungsi sebagai regulator keluaran tegangan sehingga keluaran tegangan dapat diatur sesuai keinginan. Penelitian ini menggunakan *voltage regulator model TDGC 2J-3* seperti pada gambar 3.10. Spesifikasi *voltage regulator* ini dapat dilihat pada tabel 3.3.



Gambar 3.10 *Voltage regulator* model TDGC 2J-3

Tabel 3.3 Spesifikasi *voltage regulator* model TDGC 2J-3

SPECIFICATIONS	
Phase	1
Input	110/220 V
Output	0-250 V
Capacity	3 KVA
Supply Frequency	50-60 Hz

3.2.6 Pelumas

Untuk mengurangi efek gesekan pada bearing turbin angin Savonius akibat kotoran, maka digunakan pelumas sebelum alat uji digunakan. Pada penelitian ini, menggunakan **WD-40** seperti gambar 3.11. Spesifikasi WD-40 lebih detail dapat dilihat pada tabel 3.4.



Gambar 3.11 Pelumas WD-40.

Tabel 3.4 Spesifikasi pelumas WD-40.

SPECIFICATIONS	
Appearance	Aerosol-Aerosolized Liquid
Color	Light (or pale) amber

3.2.7 Alat Ukur

3.2.7.1 Tachometer

Tachometer merupakan alat yang digunakan untuk mengukur kecepatan rotasi suatu benda. Tachometer atau dikenal dengan RPM digunakan untuk mengukur putaran mesin khususnya jumlah putaran yang dilakukan oleh sebuah poros dalam satu satuan waktu. Pada penelitian ini menggunakan **Tachometer OMEGA seri HHT13** seperti pada gambar 3.12 dengan range pengukuran antara 5 hingga 99.999 rpm akurasi pembacaan 0.01% atau ± 1 digit. Spesifikasi tachometer ini dapat dilihat pada tabel 3.5.

**Gambar 3.12** Tachometer OMEGA seri HHT13.

Tabel 3.5 Spesifikasi Tachometer OMEGA seri HHT13.

SPECIFICATIONS	
Range	5 to 99.999 rpm
Accuracy	0,01 % of reading or ± 1 digit
Resolution	0,001 to 1,0 rpm
Display	5-digit alphanumeric LCD
Power	2 "AA" 1,5 V DC batteries

3.2.7.2 Torsimeter

Torsimeter merupakan alat yang digunakan untuk mengukur torsi suatu benda yang berputar. Pada penelitian ini menggunakan torsimeter digital **LUTRON Torque Meter Model: TQ-8800** *high resolution* seperti pada gambar 3.13 dengan ketelitian 0,1 N-cm. Spesifikasi lebih detail dapat dilihat pada tabel 3.6.

**Gambar 3.13** Torsimeter LUTRON Torque Meter Model: TQ-8800.**Tabel 3.6** Spesifikasi LUTRON Torque Meter Model: TQ-8800.

Display Unit/ Resolution				
Unit	Max. range	High resolution	Low resolution	Over load protection range
N-cm	147,1 N-cm	0,1 N-cm	1 N-cm	220,1 N-cm max

3.2.7.3 Anemometer

Anemometer merupakan alat yang digunakan untuk mengukur kecepatan angin yang dihasilkan oleh *axial fan*. Pada penelitian ini menggunakan **Omega HHF141 Digital Anemometer** sebagaimana ditunjukan pada gambar 3.14. Anemometer ini memiliki tingkat keakurasian yang tinggi $\pm 1,0\%$. Spesifikasi anemometer ini dapat dilihat pada tabel 3.7.



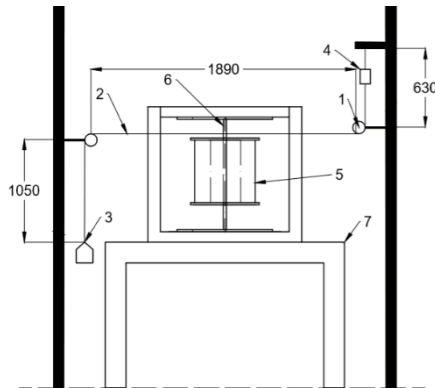
Gambar 3.14 Omega HHF141 Digital Anemometer.

Tabel 3.7 Spesifikasi Omega HHF141 Digital Anemometer.

SPECIFICATIONS	
Accuracy	AP275: +/- 1.0% of reading +/- 1 digit AP100: +/- 0.5% of F.S. +0.75% of reading + 1 digit
Resolutions	0.01 m/sec
Display	0.5 inch LCD, 4 digits
Air Flow	
Range	Resolution
AP100	1,5 to 35,00 m/sec
2,75 inch	0,2 to 40,00 m/sec

3.2.7.4 Brake Dynamometer

Brake dynamometer merupakan suatu sistem yang digunakan untuk mengukur torsi dinamis dari suatu benda yang berputar. Pada penelitian ini menggunakan skema *brake dynamometer* seperti pada gambar 3.15.



Gambar 3.15 Skema *brake dynamometer*. (1) katrol, (2) benang, (3) beban pemberat, (4) timbangan pegas, (5) turbin angin Savonius, (6) poros, (7) penyangga.

Pada sistem *brake dynamometer* ini menggunakan timbangan pegas NAGATA seperti pada gambar 3.16 dengan spesifikasi pada tabel 3.8.



Gambar 3.16 Timbangan pegas NAGATA

Tabel 3.8 Spesifikasi timbangan pegas NAGATA

SPECIFICATIONS	
Capacity	10 kg
Graduation	50 gram

Sedangkan beban pemberat menggunakan anak timbangan seperti pada gambar 3.17 dengan spesifikasi pada tabel 3.9.



Gambar 3.17 Anak timbangan

Tabel 3.9 Spesifikasi anak timbangan

SPECIFICATIONS								
Berat (gr)	1	2	5	10	20	50	200	500
Toleransi (gr)	1	1,2	1,5	2	2,5	3	5	10

Untuk menghambat putaran dari poros turbin angin Savonius, digunakan benang *nylon* LAZER seperti pada gambar 3.18 yang menghubungkan antara pegas dengan beban pemberat. Benang *nylon* LAZER berdiameter 0,6 mm mampu menahan beban hingga 20 kg.



Gambar 3.18 Benang *nylon* LAZER

3.3 Prosedur Penelitian

3.3.1 Prosedur menentukan putaran dan torsi dinamis

Langkah-langkah yang dilakukan dalam pengambilan data putaran dan torsi dinamis sebagai berikut.

1. Mengatur peralatan sesuai dengan skema penelitian
2. Menyalakan *axial fan* dan mengatur tegangan *supply* dengan menggunakan *voltage regulator* sehingga diperoleh kecepatan yang diinginkan
3. Melakukan pengukuran temperatur dengan termometer.
4. Melakukan pengukuran kecepatan angin dengan menggunakan anemometer pada bilangan Reynolds=97000.
5. Setelah kecepatan angin *steady* kemudian melakukan pengukuran kecepatan putaran poros dengan tachometer.
6. Melakukan pengukuran torsi dinamis dengan menggunakan *brake dynamometer* tanpa pembebanan.
7. Memberi beban pemberat.
8. Mengukur putaran turbin dengan menggunakan tachometer.
9. Mengukur beban pegas.
10. Mengulangi langkah 7-9 dengan penambahan beban pemberat sampai turbin berhenti berputar.
11. Mengulangi langkah 4-10 dengan variasi bilangan Reynolds=145000 dan 178000.
12. Meletakkan pengganggu dengan mengatur jarak antara pusat silinder pengganggu dan pusat *returning blade* (S/D) sebesar 1,8 dan posisi silinder pengganggu dalam arah tegak lurus dengan arah datangnya angin terhadap diameter turbin (y/D) sebesar 0,0.
13. Mengulangi langkah 4-10.
14. Mengulangi langkah 4-10 dengan variasi y/D=0,25 dan 0,5.
15. Mematikan *axial fan*.

16. Mengolah semua data yang diperoleh (putaran dan torsi dinamis) dan melakukan *plotting*, perbandingan *coefficient of moment* (Cm) dengan dan tanpa silinder pengganggu terhadap λ , dan perbandingan *coefficient of power* (CoP) dengan dan tanpa silinder pengganggu terhadap λ

3.3.2 Prosedur menentukan torsi statis

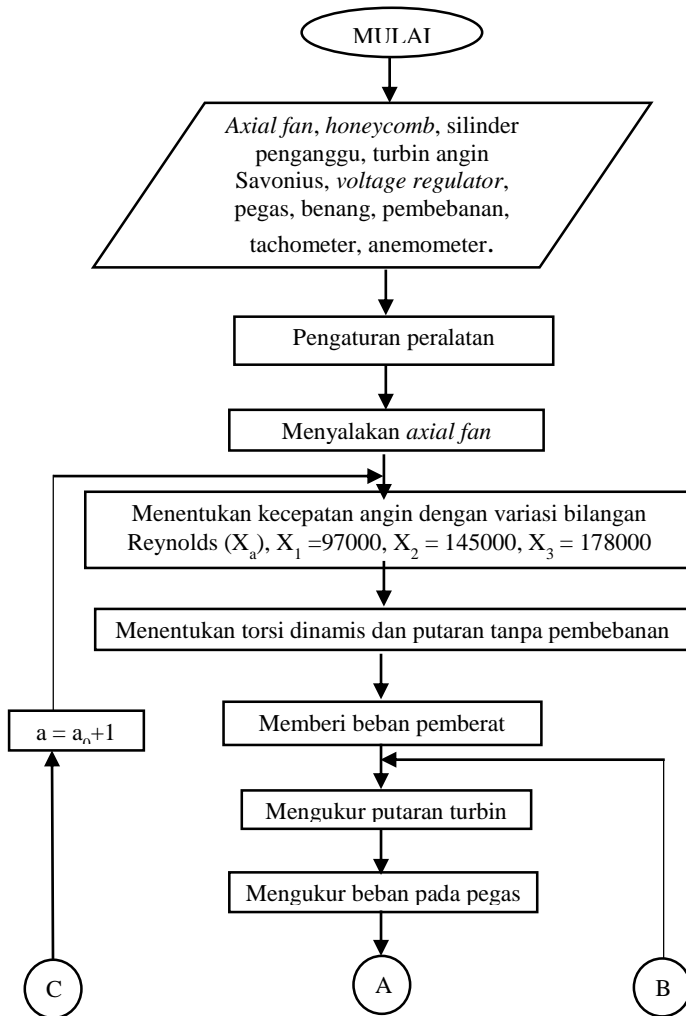
Langkah-langkah yang dilakukan dalam pengambilan data torsi statis sebagai berikut.

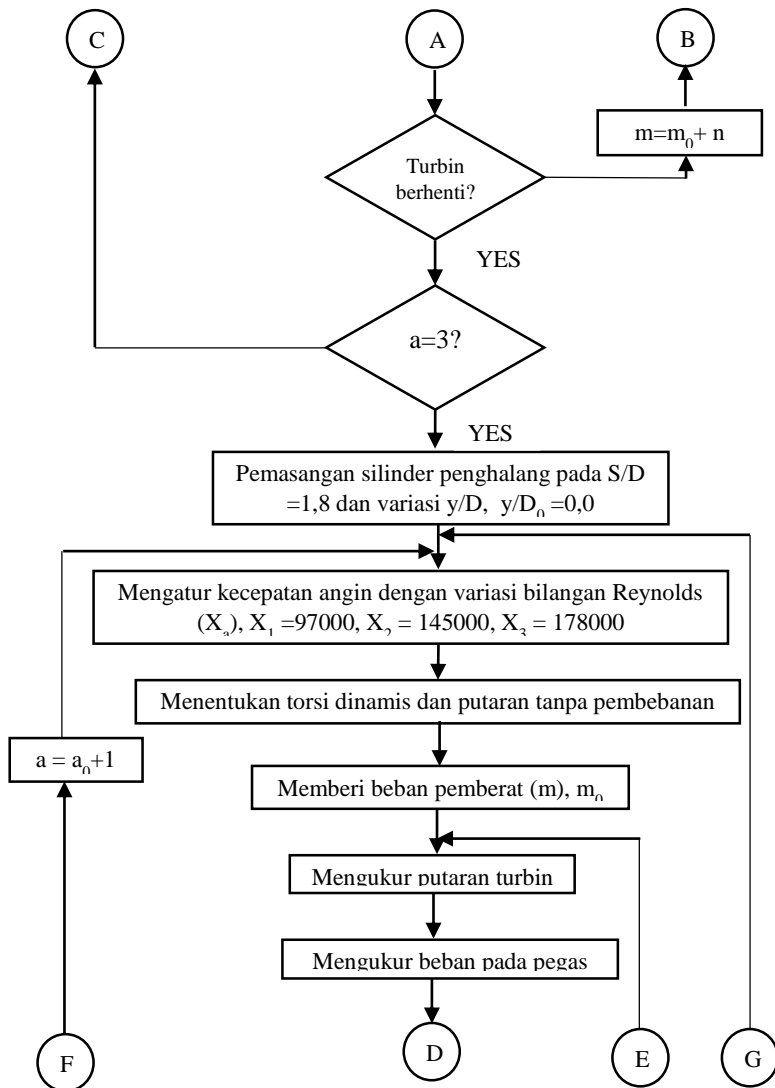
1. Mengatur peralatan sesuai dengan skema penelitian.
2. Mengatur sudut turbin angin Savonius sebesar 0° .
3. Mengunci torsimeter pada poros turbin angin Savonius.
4. Menyalakan *axial fan* dan mengatur tegangan *supply* dengan menggunakan *voltage regulator*.
5. Melakukan pengukuran kecepatan angin dengan menggunakan anemometer pada bilangan Reynolds=97000.
6. Setelah kecepatan angin *steady* kemudian melakukan pengukuran torsi statis dengan menggunakan torsimeter.
7. Mengulangi langkah 4 sampai 5 untuk bilangan Reynolds=145000 dan 178000.
8. Membuka kunci torsimeter pada poros turbin angin Savonius.
9. Mematikan *axial fan*.
10. Mengulangi langkah 2 sampai 9 dengan variasi sudut turbin angin Savonius sampai dengan 180° dengan kenaikan 10° .
11. Meletakkan silinder pengganggu dengan mengatur jarak antara pusat silinder pengganggu dan pusat *returning blade* (S/D) sebesar 1,8 dan posisi silinder pengganggu dalam arah tegak lurus dengan arah datangnya angin terhadap diameter turbin (y/D) sebesar 0,0.
12. Mengulangi langkah 2 sampai 9.

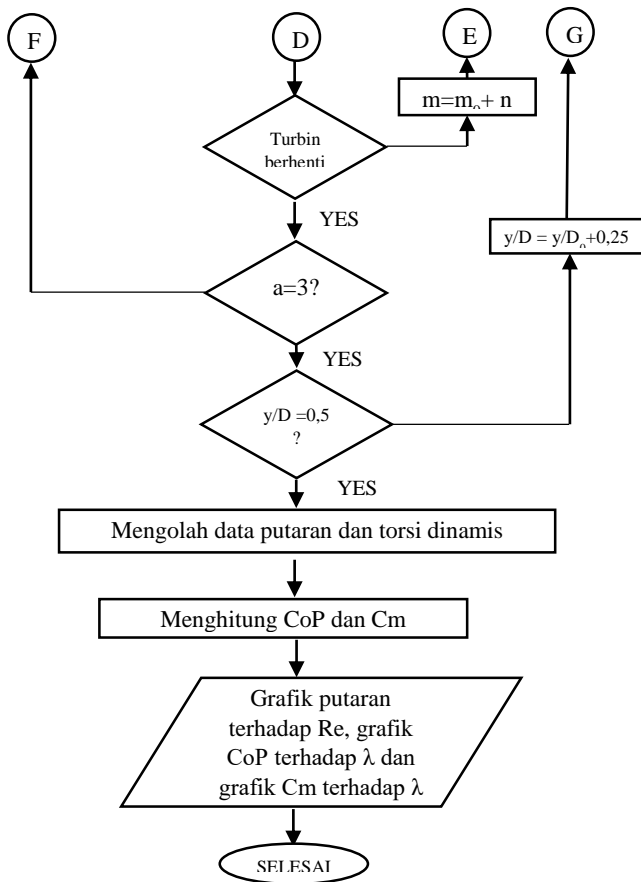
13. Mengulangi langkah 2 sampai dengan mengubah y/D menjadi 0,25 dan 0,5.
14. Mengolah data torsi statis yang diperoleh dan melakukan *plotting*, perbandingan torsi statis dengan dan tanpa silinder pengganggu terhadap θ .

3.4 Flowchart Penelitian

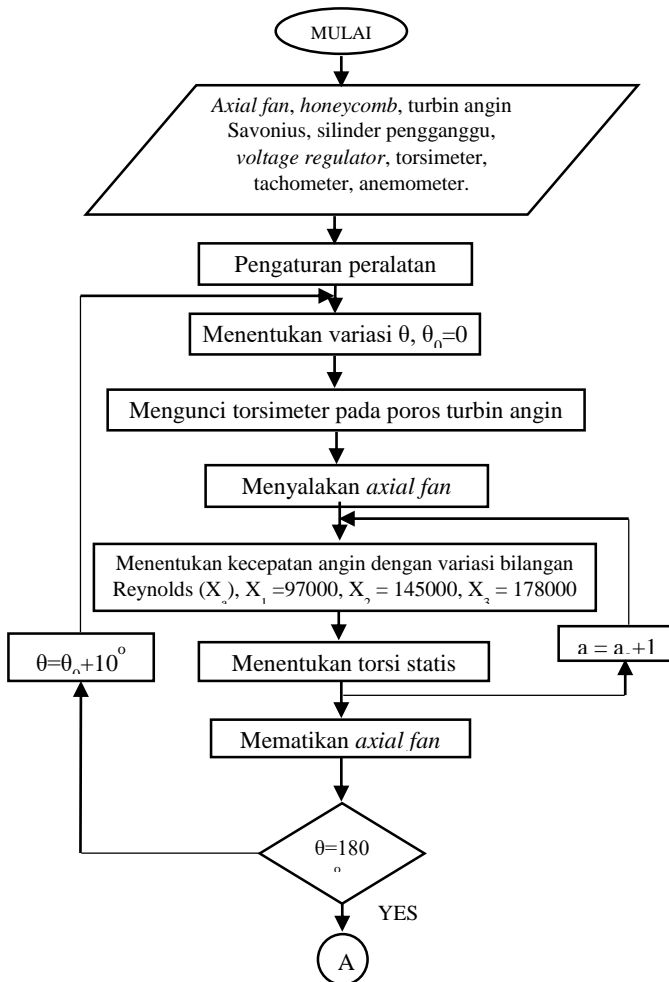
3.4.1 Flowchart menentukan putaran dan torsi dinamis

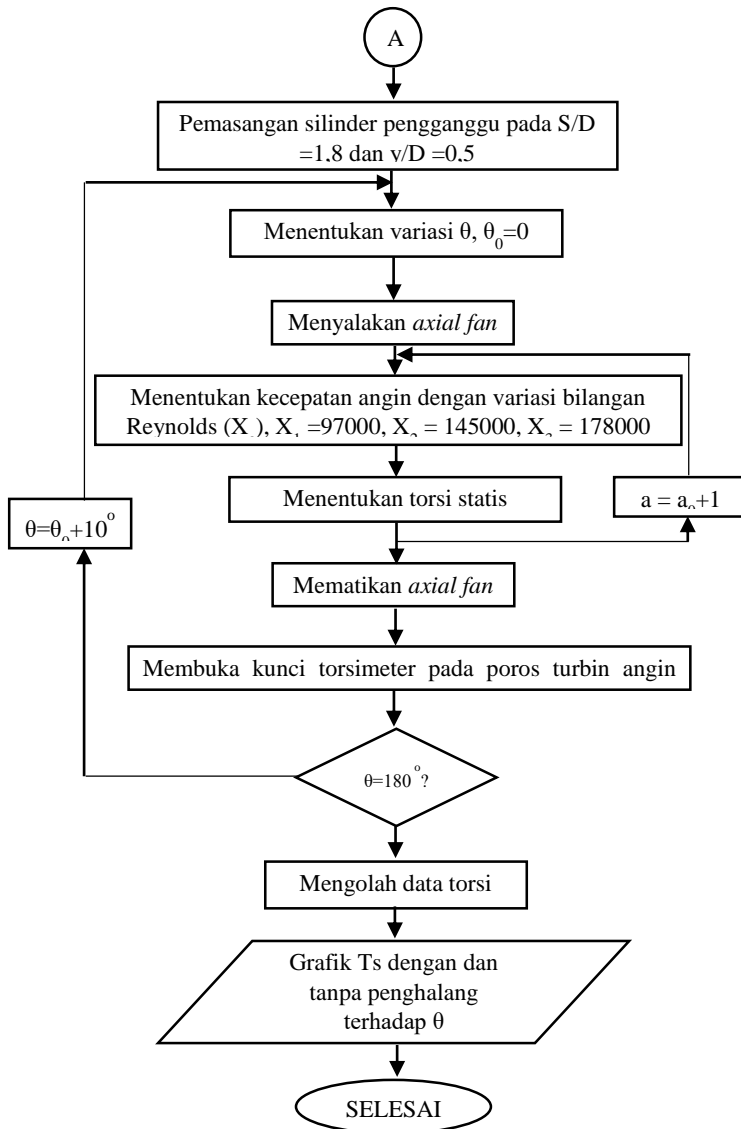






3.4.2 Flowchart menentukan torsi statis





“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

4.1 Contoh Perhitungan

4.1.1 Perhitungan Bilangan Reynolds

Persamaan untuk mendapatkan bilangan Reynolds adalah sebagai berikut.

$$Re = \frac{\rho V L}{\mu}$$

Perhitungan massa jenis udara (ρ) menggunakan persamaan Boyle-Gay Lussac tentang persamaan gas ideal sebagai berikut.

$$P = \rho R T \dots\dots\dots(4.1)$$

Dimana :

P : tekanan absolut udara, diasumsikan sebesar 1 atm (101325 Pa)

ρ : massa jenis udara (kg/m^3)

R : konstanta spesifik gas = 287,058 J/kg.K

T : temperatur udara = 28,2 °C (301,2 K)

Sehingga diperoleh nilai massa jenis udara (ρ) sebagai berikut.

$$\rho = \frac{P}{RT} = \frac{101325 \text{ Pa}}{287,058 \frac{\text{J}}{\text{kg}} \times 301,2 \text{ K}} = 1,1772 \text{ kg/m}^3$$

Pehitungan viskositas absolut udara (μ) menggunakan persamaan Sutherland sebagai berikut.

$$\mu = \frac{b T^{3/2}}{S + T} \dots\dots\dots(4.2)$$

dimana,

$$b = 1,458 \times 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{m.s.K}^{0,5}}$$

$$S = 110,4 \text{ K}$$

Sehingga diperoleh nilai viskositas absolut udara (μ) sebagai berikut.

$$\mu = \frac{b T^{\frac{3}{2}}}{S + T} = \frac{1,458 \times 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{m.s.K}^{0,5}} \times (301,2 \text{ K})^{\frac{3}{2}}}{110,4 \text{ K} + 301,2 \text{ K}}$$

$$= 1,8516 \times 10^{-5} \frac{kg}{m.s}$$

Dengan nilai massa jenis udara dan viskositas udara tersebut, untuk memperoleh bilangan Reynolds (Re) 97000 pada turbin dengan panjang karakteristik 0,3034 meter maka nilai kecepatan *freestream* udara didapatkan dari perhitungan sebagai berikut.

$$V = \frac{Re \times \mu}{\rho \times L} = \frac{97000 \times 1,8516 \times 10^{-5} \frac{kg}{m.s}}{1,1719 \text{ kg/m}^3 \times 0,3034 \text{ m}} = 5,05 \text{ m/s}$$

4.1.2 Perhitungan *Tip Speed Ratio*

Persamaan untuk mendapatkan *tip speed ratio* (λ) adalah sebagai berikut.

$$\lambda = \frac{\omega R}{V}$$

$$\omega = \frac{2\pi n}{60}$$

$$R = \frac{L}{2} = \frac{2D-b}{2}$$

dimana :

ω : kecepatan angular turbin angin Savonius (rad/s)

n : putaran turbin angin Savonius (rpm)

R : jari-jari turbin (m)

V : kecepatan angin (m/s)

Contoh perhitungan berikut menggunakan data pada bilangan Reynolds 97000 tanpa silinder pengganggu dimana

$$n = 353,9 \text{ rpm}$$

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} = \frac{2 \times \pi \times 353,9 \text{ rpm}}{60} = 37,04 \text{ rad/s}$$

$$R = \frac{303,4 \text{ m}}{2} = 0,1517 \text{ m}$$

Sehingga didapatkan nilai *tip speed ratio*,

$$\lambda = \frac{\omega r}{V} = \frac{37,04 \frac{rad}{s} \times 0,1517 \text{ m}}{5,05 \text{ m/s}} = 1,112$$

4.1.3 Perhitungan Torsi Dinamis

Persamaan untuk mendapatkan torsi dinamis adalah sebagai berikut.

$$T = \{(s - M) \times g\} \times R$$

dimana :

T : torsi dinamis (Nm)

M : massa beban (gram)

s : massa yang terbaca pegas (gram)

g : gravitasi bumi ($9,81 \text{ m/s}^2$)

R : jari-jari poros yang dihambat (m)

Contoh perhitungan berikut menggunakan data pada bilangan Reynolds 97000 tanpa silinder pengganggu dimana

$$M = 15 \text{ gram}$$

$$s = 190 \text{ gram}$$

$$R = 0,0095 \text{ m}$$

Sehingga didapatkan nilai torsi dinamis,

$$T = \{(s - M) \times g\} \times R$$

$$T = \left\{ \left(\frac{190-15}{1000} \right) \text{ kg} \times 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right\} \times 0,0095 \text{ m}$$

$$T = 0,0163 \text{ Nm}$$

4.1.4 Perhitungan *Coefficient of Power*

Persamaan untuk mendapatkan *Coefficient of Power* (CoP) adalah sebagai berikut.

$$CoP = \frac{T \times \omega}{\frac{1}{2} \rho A V^3}$$

$$A = L \times H$$

dimana :

T : torsi dinamis (Nm)

ω : kecepatan angular turbin angin Savonius (rad/s)

ρ : massa jenis udara (kg/m^3)

A : luas sapuan turbin oleh angin (m^2)

V : kecepatan angin (m/s)

L : panjang karakteristik turbin (m)

H : tinggi turbin (m)

Contoh perhitungan berikut menggunakan data pada bilangan Reynolds=97000 tanpa silinder pengganggu dimana

$$L = 0,3034 \text{ m}$$

$$H = 0,2944 \text{ m}$$

Perhitungan luas sapuan turbin adalah sebagai berikut,

$$A = L \times H = 0,3034 \text{ m} \times 0,2944 \text{ m} = 0,0893 \text{ m}^2$$

Sehingga didapatkan nilai *Coefficient of Power* (CoP) sebagai berikut,

$$CoP = \frac{0,0163 \text{ Nm} \times 37,04 \text{ rad/s}}{\frac{1}{2} \times 1,1772 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 0,0893 \text{ m}^2 \times (5,05 \text{ m/s})^3}$$

$$CoP = 0,0891$$

4.1.5 Perhitungan *Coefficient of Moment*

Persamaan untuk mendapatkan *Coefficient of Moment* (Cm) adalah sebagai berikut.

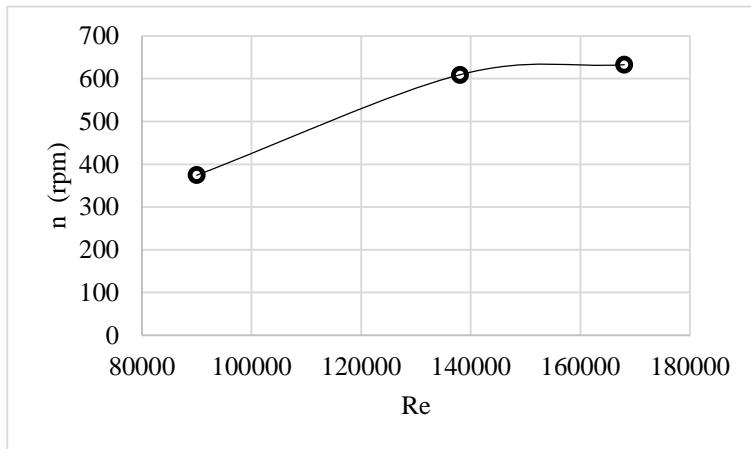
$$Cm = \frac{T}{\frac{1}{2} \rho A V^2}$$

Sehingga didapatkan nilai *Coefficient of Moment* (Cm) sebagai berikut,

$$Cm = \frac{0,0163 \text{ Nm}}{0,5 \times 1,1772 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 0,0893 \text{ m}^2 \times (5,05 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2} = 0,0122$$

4.2 Analisa Performa Turbin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu

4.2.1 Analisa Nilai Putaran (n) terhadap Bilangan Reynolds (Re) Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu



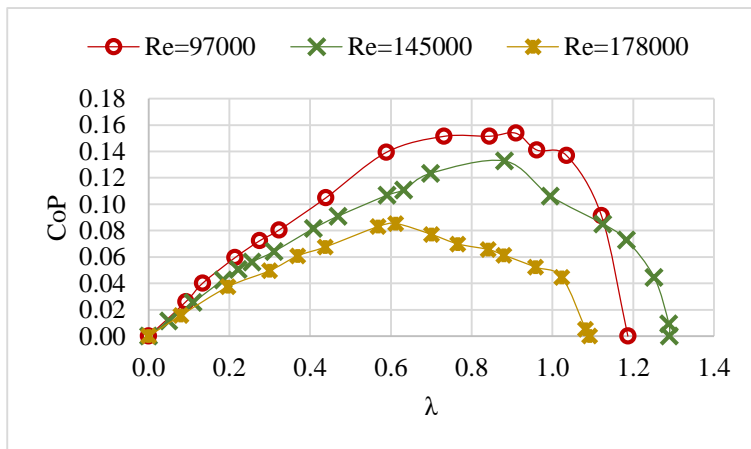
Gambar 4.1 Grafik putaran (n) terhadap bilangan Reynolds (Re) turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu

Pada gambar 4.1 merupakan grafik putaran (n) terhadap bilangan Reynolds (Re) turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu. Penelitian ini dilakukan tanpa adanya silinder pengganggu di depan *returning blade*.

Putaran pada turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu menunjukkan nilai yang semakin tinggi seiring dengan meningkatnya bilangan Reynolds dimana putaran tertinggi didapatkan pada bilangan Reynolds=178000 sebesar 632,86 rpm kemudian turun menjadi 609,20 rpm pada bilangan Reynolds=145000 dan putaran terendah sebesar 374,57 rpm pada bilangan Reynolds=97000.

Hal tersebut terjadi karena semakin besar bilangan Reynolds, maka semakin besar pula kecepatan angin yang mengalir. Dengan meningkatnya kecepatan angin, maka putaran yang dihasilkan oleh turbin semakin besar. Oleh karena itu, semakin besar bilangan Reynolds maka semakin besar putaran turbin angin Savonius.

4.2.2 Analisa Nilai *Coefficient of Power* (CoP) terhadap *Tip Speed Ratio* (λ) Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu



Gambar 4.2 Grafik *Coefficient of Power* (CoP) terhadap *tip speed ratio* (λ) turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu

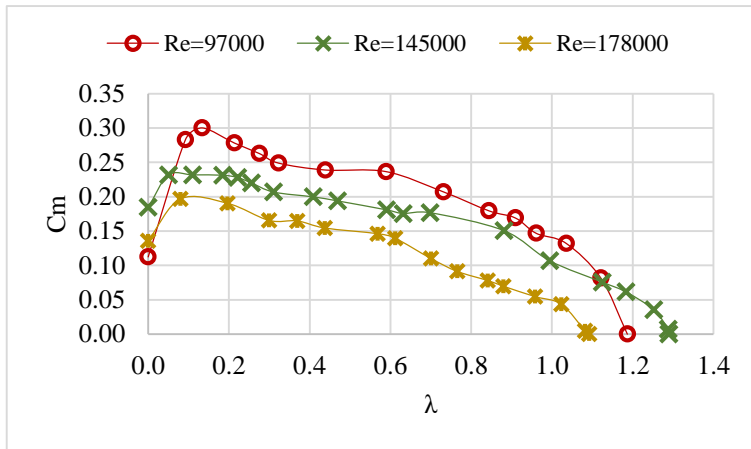
Pada gambar 4.2 merupakan grafik nilai *Coefficient of Power* (CoP) terhadap *tip speed ratio* (λ) turbin angin Savonius dengan bervariasi bilangan Reynolds=97000; 145000; dan 178000. Penelitian ini dilakukan tanpa adanya silinder pengganggu di depan *returning blade*.

Grafik *Coefficient of Power* (CoP) terhadap *tip speed ratio* (λ) menunjukkan *trend line parabolic* seperti pada gambar 4.2

dimana nilai CoP akan naik sampai titik maksimum pada *tip speed ratio* optimum kemudian nilai CoP akan turun seiring bertambahnya *tip speed ratio*. Pada bilangan Reynolds=97000 menunjukkan nilai *Coefficient of Power* (CoP) maksimum sebesar 0,154 (15,4%) pada *tip speed ratio* 0,910, kemudian disusul bilangan Reynolds=145000 dengan nilai CoP maksimum sebesar 0,133 (13,3%) pada *tip speed ratio* 0,881 sedangkan nilai CoP maksimum pada bilangan Reynolds=178000 sebesar 0,085 (8,5%) pada *tip speed ratio* 0,612.

Pada umumnya, semakin tinggi bilangan Reynolds maka semakin tinggi pula kecepatan angin dan putaran yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius. Dengan semakin meningkatnya putaran, torsi yang dihasilkan juga semakin besar sehingga mampu meningkatkan nilai CoP. Tetapi, pada penelitian ini didapatkan bahwa nilai CoP maksimum tertinggi didapatkan pada bilangan Reynolds=97000 sedangkan nilai CoP maksimum terendah didapatkan pada bilangan Reynolds=178000 dimana hal ini dapat terjadi karena pada bilangan Reynolds tinggi, kecepatan angin yang mengalir juga semakin tinggi. Kecepatan angin yang tinggi dapat menyebabkan peningkatan daya *input* pada turbin. Apabila peningkatan daya *input* akibat peningkatan kecepatan angin lebih besar dibandingkan dengan peningkatan daya *output* akibat peningkatan putaran, maka perbandingan daya *output* dan daya *input* pada bilangan Reynolds=178000 menghasilkan nilai CoP yang lebih kecil. Selain itu, berdasarkan grafik diatas semakin tinggi bilangan Reynolds maka *tip speed ratio* yang dihasilkan semakin rendah. Hal ini disebabkan karena peningkatan kecepatan tangensial pada turbin lebih rendah dari peningkatan kecepatan angin, sehingga *tip speed ratio* yang dihasilkan lebih rendah. Pada desain turbin angin Savonius ini diduga nilai CoP yang diperoleh berada setelah nilai CoP maksimum *tip speed ratio* optimum. Sehingga semakin tinggi bilangan Reynolds maka nilai CoP yang dihasilkan semakin rendah.

4.2.3 Analisa Nilai *Coefficient of Moment* (C_m) terhadap *Tip Speed Ratio* (λ) Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu



Gambar 4.3 Grafik *Coefficient of Moment* (C_m) terhadap *tip speed ratio* (λ) turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu

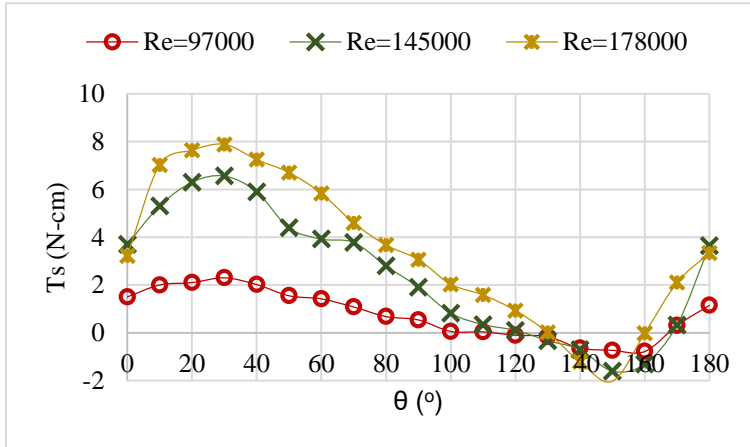
Pada gambar 4.3 merupakan grafik nilai *Coefficient of Moment* (C_m) terhadap *tip speed ratio* (λ) turbin angin Savonius dengan bervariasi bilangan Reynolds=97000; 145000; dan 178000. Penelitian ini dilakukan tanpa adanya silinder pengganggu di depan *returning blade*.

Grafik *Coefficient of Moment* (C_m) terhadap *tip speed ratio* (λ) menunjukkan kenaikan C_m pada *tip speed ratio* 0-0,134 dengan nilai C_m maksimum sebesar 0,601 pada bilangan Reynolds=97000 kemudian grafik mengalami penurunan. Pada bilangan Reynolds=145000 mengalami kenaikan C_m pada *tip speed ratio* 0-0,050 dengan nilai C_m maksimum sebesar 0,232 kemudian mengalami penurunan seiring bertambahnya *tip speed ratio* sedangkan pada bilangan Reynolds=178000 mengalami kenaikan C_m pada *tip speed ratio* 0-0,080 dengan nilai C_m

maksimum sebesar 0,197 kemudian mengalami penurunan seiring meningkatnya *tip speed ratio*.

Pada umumnya, semakin tinggi bilangan Reynolds maka semakin tinggi pula kecepatan angin dan putaran yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius. Dengan semakin meningkatnya putaran, torsi yang dihasilkan juga semakin besar sehingga nilai C_m semakin tinggi pula. Tetapi, pada penelitian ini didapatkan bahwa nilai C_m maksimum tertinggi didapatkan pada bilangan Reynolds=97000 sedangkan nilai C_m maksimum terendah didapatkan pada bilangan Reynolds=178000 dimana hal ini dapat terjadi karena pada bilangan Reynolds tinggi, kecepatan angin yang mengalir juga semakin tinggi. Kecepatan angin yang tinggi dapat menyebabkan peningkatan torsi *input* pada turbin. Apabila peningkatan torsi *input* akibat peningkatan kecepatan angin lebih besar dibandingkan dengan peningkatan torsi *output* akibat peningkatan putaran, maka perbandingan torsi *output* dan torsi *input* pada bilangan Reynolds=178000 menghasilkan nilai CoP yang lebih kecil. Selain itu, berdasarkan grafik diatas semakin tinggi bilangan Reynolds maka *tip speed ratio* yang dihasilkan semakin rendah. Hal ini disebabkan karena peningkatan kecepatan tangensial pada turbin lebih rendah dari peningkatan kecepatan angin, sehingga *tip speed ratio* yang dihasilkan lebih rendah. Pada desain turbin angin Savonius ini diduga nilai C_m yang diperoleh berada setelah nilai C_m maksimum *tip speed ratio* optimum. Sehingga semakin tinggi bilangan Reynolds maka nilai C_m yang dihasilkan semakin rendah.

4.2.4 Analisa Nilai Torsi Statis (T_s) terhadap Posisi angular sudu (θ) Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu



Gambar 4.4 Grafik torsi statis (T_s) terhadap posisi angular sudu (θ) turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu

Pada gambar 4.4 merupakan grafik torsi statis (T_s) terhadap posisi angular sudu (θ) turbin angin Savonius dengan bervariasi bilangan Reynolds=97000; 145000; dan 178000. Penelitian ini dilakukan tanpa adanya silinder pengganggu di depan *returning blade*.

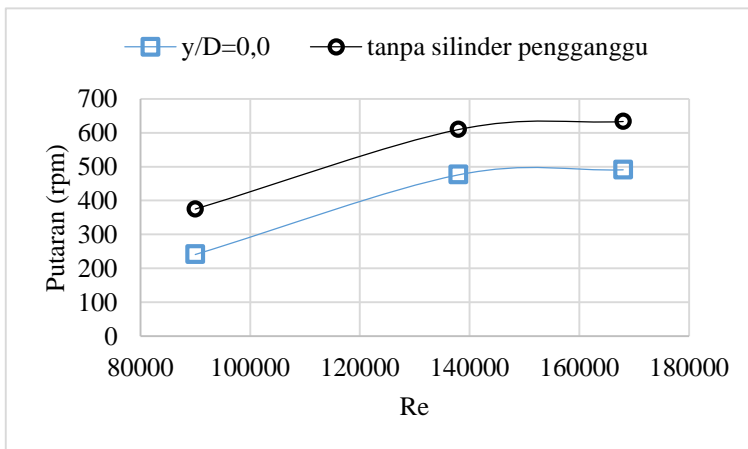
Grafik torsi statis (T_s) terhadap posisi angular sudu (θ) membentuk grafik sinusoidal dimana torsi statis maksimum terjadi pada sudut 30° sebesar 7,88 N-cm pada bilangan Reynolds=178000, kemudian bilangan Reynolds = 145000 sebesar 6,56 N-cm dan bilangan Reynolds = 97000 sebesar 2,3 N-cm sedangkan torsi statis minimum sebesar -2,03 N-cm pada sudut 150° bilangan Reynolds = 178000 kemudian bilangan Reynolds = 145000 sebesar -1,61 N-cm pada sudut 150° dan bilangan Reynolds = 97000 sebesar -0,78 N-cm pada sudut 160° .

Berdasarkan grafik, torsi statis maksimum tertinggi terjadi pada saat bilangan Reynolds = 178000 dimana hal ini terjadi karena semakin tinggi bilangan Reynolds, kecepatan angin juga semakin tinggi, maka semakin besar pula torsi yang dibutuhkan untuk menahan putaran turbin, sedangkan torsi statis maksimum terendah didapatkan pada bilangan Reynolds = 97000 dimana hal ini terjadi karena pada bilangan Reynolds rendah, kecepatan juga semakin rendah, torsi yang dibutuhkan untuk menahan putaran turbin menjadi lebih kecil. Pada posisi angular sudu (θ) 30° diperoleh torsi statis maksimum karena pada posisi posisi angular sudu tersebut, *advancing blade* diduga menerima gaya *drag* lebih tinggi yang menyebabkan torsi positif semakin bertambah serta *returning blade* diduga menerima gaya *drag* lebih rendah sehingga perbedaan gaya *drag* pada kedua sudu lebih besar dan dibutuhkan torsi yang besar untuk menahan putaran turbin, sedangkan pada posisi angular sudu (θ) 150° diperoleh torsi statis minimum karena pada posisi posisi angular sudu tersebut, *advancing blade* menerima gaya *drag* yang lebih rendah yang menyebabkan torsi positif berkurang serta *returning blade* diduga menerima gaya *drag* lebih tinggi sehingga perbedaan torsi pada kedua sudu lebih kecil dan dibutuhkan torsi yang kecil untuk menggerakkan turbin. Nilai negatif pada torsi statis menunjukkan bahwa gaya *drag* pada *returning blade* lebih besar dibandingkan dengan gaya *drag* pada *advancing blade* sehingga perbedaan gaya *drag* kedua sudu menghasilkan torsi negatif yang berputar berlawanan dengan arah turbin sehingga menunjukkan kemampuan *self starting* yang rendah. Oleh karena itu, turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu menghasilkan torsi tertinggi pada bilangan Reynolds = 178000 dengan torsi maksimum pada sudut 30° dan torsi minimum pada sudut 150° .

4.3 Analisa Performa Turbin Angin Savonius Dengan Silinder Pengganggu

4.3.1 Analisa Nilai Putaran terhadap Bilangan Reynolds (Re) Turbin Angin Savonius Dengan Silinder Pengganggu

4.3.1.1 Analisa Nilai Putaran terhadap Bilangan Reynolds (Re) Turbin Angin Savonius Dengan Silinder Pengganggu pada $y/D=0,0$



Gambar 4.5 Grafik putaran (n) terhadap bilangan Reynolds (Re) turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu dan dengan silinder pengganggu pada $y/D=0,0$

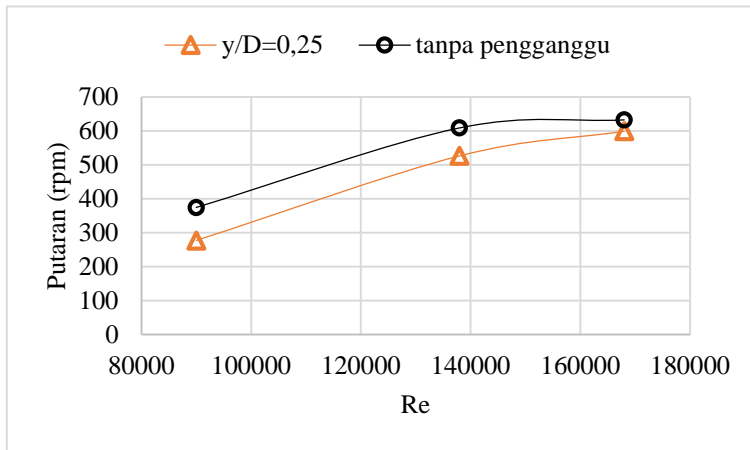
Pada gambar 4.5 merupakan grafik putaran (n) terhadap bilangan Reynolds (Re) turbin angin Savonius dimana membandingkan tanpa silinder pengganggu dan dengan silinder pengganggu yang diletakkan pada jarak $S/D=1,8$ dan $y/D=0,0$.

Putaran pada turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada $y/D=0,0$ menunjukkan nilai yang semakin tinggi seiring dengan meningkatnya bilangan Reynolds dimana putaran

tertinggi didapatkan pada bilangan Reynolds = 178000 sebesar 490,95 rpm kemudian turun menjadi 476,14 rpm pada bilangan Reynolds = 145000 dan putaran terendah sebesar 241,34 rpm pada bilangan Reynolds = 97000. Putaran turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu menghasilkan putaran yang lebih tinggi dibandingkan dengan silinder pengganggu yaitu pada bilangan Reynolds = 97000 menghasilkan putaran sebesar 374,57 rpm, sedangkan pada bilangan Reynolds = 145000 menghasilkan putaran sebesar 609,20 rpm dan pada bilangan Reynolds = 178000 menghasilkan putaran sebesar 632,86 rpm.

Hal tersebut terjadi karena semakin besar bilangan Reynolds, maka semakin besar pula kecepatan angin yang mengalir. Dengan meningkatnya kecepatan angin, maka putaran yang dihasilkan oleh turbin semakin besar. Oleh karena itu, semakin besar bilangan Reynolds maka semakin besar putaran turbin angin Savonius. Berdasarkan gambar 4.5, turbin angin Savonius dengan pemberian silinder pengganggu pada $S/D=1,8$ dan $y/D=0$ menghasilkan putaran yang lebih rendah dibandingkan turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu. Hal ini terjadi karena penempatan silinder pengganggu pada posisi $y/D=0,0$ dapat menghalangi aliran yang mengarah ke *advancing blade* sehingga aliran yang mengenai *advancing blade* berkurang yang menyebabkan gaya *drag* pada *advancing blade* berkurang, sedangkan *shear layer* pada silinder pengganggu kurang efektif memberi gangguan *boundary layer* pada *returning blade* dan kurang efektif menurunkan *pressure drag* pada *returning blade* sehingga gaya *drag* pada *returning blade* tidak berkurang secara signifikan. Akibatnya, berpengaruh terhadap berkurangnya putaran turbin angin Savonius. Oleh karena itu, pemberian silinder pengganggu di depan *returning blade* pada $S/D=1,8$ dan $y/D=0,0$ tidak efektif meningkatkan putaran turbin angin Savonius.

4.3.1.2 Analisa Nilai Putaran terhadap Bilangan Reynolds (Re) Turbin Angin Savonius Dengan Silinder Pengganggu pada $y/D=0,25$



Gambar 4.6 Grafik putaran (n) terhadap bilangan Reynolds (Re) turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu dan dengan silinder pengganggu pada $y/D=0,25$

Pada gambar 4.6 merupakan grafik putaran (n) terhadap bilangan Reynolds (Re) turbin angin Savonius dimana membandingkan tanpa silinder pengganggu dan dengan silinder pengganggu yang diletakkan pada jarak $S/D=1,8$ dan $y/D=0,25$.

Putaran pada turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada $y/D=0,25$ menunjukkan nilai yang semakin tinggi seiring dengan meningkatnya bilangan Reynolds dimana putaran tertinggi didapatkan pada bilangan Reynolds=178000 sebesar 599,77 rpm kemudian turun menjadi 526,99 rpm pada bilangan Reynolds=145000 dan putaran terendah sebesar 277,52 rpm pada bilangan Reynolds=97000. Putaran turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu menghasilkan putaran yang lebih tinggi dibandingkan dengan silinder pengganggu yaitu pada bilangan Reynolds=97000 menghasilkan putaran sebesar 374,57

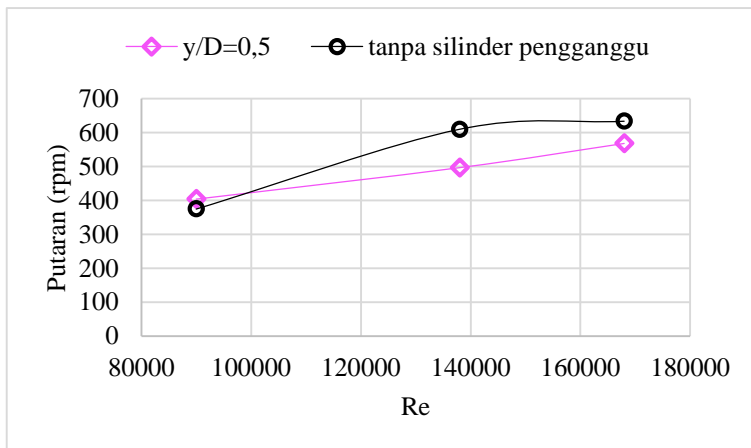
rpm, sedangkan pada bilangan Reynolds=145000 menghasilkan putaran sebesar 609,20 rpm dan pada bilangan Reynolds=178000 menghasilkan putaran sebesar 632,86 rpm.

Hal tersebut terjadi karena semakin besar bilangan Reynolds, maka semakin besar pula kecepatan angin yang mengalir. Dengan meningkatnya kecepatan angin, maka putaran yang dihasilkan oleh turbin semakin besar. Oleh karena itu, semakin besar bilangan Reynolds maka semakin besar putaran turbin angin Savonius. Berdasarkan gambar 4.6, turbin angin Savonius dengan pemberian silinder pengganggu pada $S/D=1,8$ dan $y/D=0,25$ menghasilkan putaran yang lebih rendah dibandingkan turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu. Hal ini terjadi karena penempatan silinder pengganggu pada posisi $y/D=0,25$ diduga *shear layer* pada silinder pengganggu tersebut kurang efektif memberi gangguan *boundary layer* pada *returning blade* kurang efektif menurunkan *pressure drag* pada *returning blade* sehingga gaya *drag* pada *returning blade* tidak berkurang secara signifikan. Akibatnya, berpengaruh terhadap berkurangnya putaran turbin angin Savonius. Oleh karena itu, pemberian silinder pengganggu di depan *returning blade* pada $S/D=1,8$ dan $y/D=0,25$ tidak efektif meningkatkan putaran turbin angin Savonius.

4.3.1.3 Analisa Nilai Putaran terhadap Bilangan Reynolds (Re) Turbin Angin Savonius Dengan Silinder Pengganggu pada $y/D=0,5$

Pada gambar 4.7 merupakan grafik putaran (n) terhadap bilangan Reynolds (Re) turbin angin Savonius dimana membandingkan tanpa silinder pengganggu dan dengan silinder pengganggu yang diletakkan pada jarak $S/D=1,8$ dan $y/D=0,5$. Putaran pada turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada $y/D=0,5$ menunjukkan nilai yang semakin tinggi seiring dengan meningkatnya bilangan Reynolds dimana putaran tertinggi didapatkan pada bilangan Reynolds=178000 sebesar 568,05 rpm kemudian turun menjadi 496,66 rpm pada bilangan

Reynolds=145000 dan putaran terendah sebesar 403,97 rpm pada bilangan Reynolds=97000. Putaran turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu menghasilkan putaran yang lebih tinggi dibandingkan dengan silinder pengganggu hanya pada bilangan Reynolds=97000 dimana putaran yang dihasilkan sebesar 374,57 rpm, sedangkan pada bilangan Reynolds=145000 dan 178000 menghasilkan putaran yang lebih rendah dibandingkan dengan silinder pengganggu masing-masing sebesar 609,20 rpm dan 632,86 rpm. Sehingga peningkatan putaran turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada $y/D=0,5$ dan pada bilangan Reynolds=97000 sebesar 7,85%.



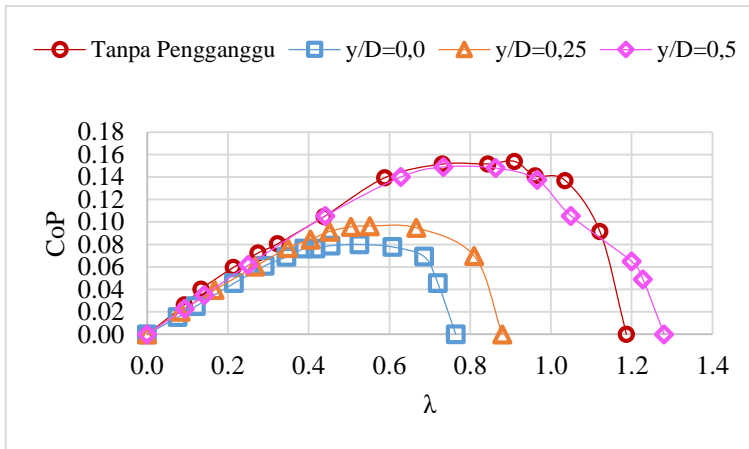
Gambar 4.7 Grafik putaran (n) terhadap bilangan Reynolds (Re) turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu dan dengan silinder pengganggu pada $y/D=0,5$

Hal tersebut terjadi karena semakin besar bilangan Reynolds, maka semakin besar pula kecepatan angin yang mengalir. Dengan meningkatnya kecepatan angin, maka putaran yang dihasilkan oleh turbin semakin besar. Oleh karena itu, semakin besar bilangan Reynolds maka semakin besar putaran turbin angin Savonius. Berdasarkan gambar 4.7, turbin angin

Savonius dengan pemberian silinder pengganggu pada $S/D=1,8$ dan $y/D=0,5$ menghasilkan putaran yang lebih tinggi pada bilangan Reynolds=97000 dibandingkan turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu. Pemberian pengganggu berupa silinder di depan *returning blade* pada $y/D=0,5$ diduga dapat mengganggu *boundary layer* pada *returning blade* dengan mempercepat transisi aliran dari laminar ke turbulen sehingga titik separasi pada *returning blade* dapat ditunda dan daerah *wake* dibelakang *returning blade* semakin kecil. Semakin kecil *wake* yang dihasilkan, maka gaya hambat pada *returning blade* semakin kecil. Selain itu, pemberian silinder penghalang di depan *returning blade* diduga secara efektif dapat menurunkan *pressure drag* pada *returning blade* sehingga perbedaan gaya hambat pada *advancing blade* dan *returning blade* semakin besar yang menyebabkan peningkatan torsi pada turbin. Akibatnya dapat berpengaruh pada peningkatan putaran turbin angin Savonius. Tetapi, semakin tinggi bilangan Reynolds, *boundary layer* pada *returning blade* berada dalam kondisi turbulen sehingga pemberian silinder pengganggu kurang efektif memberikan perubahan pada *boundary layer* tersebut tetapi akan menambah gaya gesek yang terjadi pada turbin tersebut. Sehingga, pengurangan gaya *drag* pada *returning blade* kurang efektif. Akibatnya dapat berpengaruh terhadap penurunan putaran turbin angin Savonius. Oleh karena itu, pemberian silinder pengganggu di depan *returning blade* pada $S/D=1,8$ dan $y/D=0,5$ secara efektif dapat meningkatkan putaran turbin angin Savonius pada bilangan Reynolds=97000 dengan peningkatan sebesar 7,85%.

4.3.2 Analisa Nilai *Coefficient of Power* (CoP) terhadap *Tip Speed Ratio* (λ) Turbin Angin Savonius Dengan Silinder Pengganggu

4.3.2.1 Analisa Nilai *Coefficient of Power* (CoP) terhadap *Tip Speed Ratio* (λ) Turbin Angin Savonius Dengan Silinder Pengganggu pada Bilangan Reynolds=97000



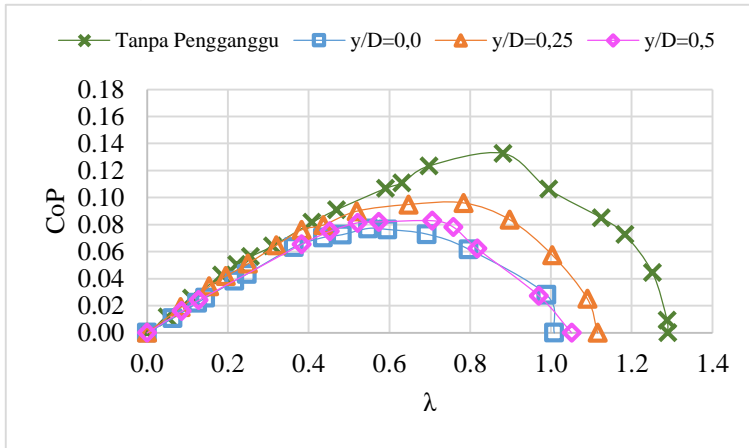
Gambar 4.8 Grafik *Coefficient of Power* (CoP) terhadap *tip speed ratio* (λ) turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu dan tanpa pengganggu pada bilangan Reynolds=97000

Gambar 4.8 menunjukkan grafik *Coefficient of Power* (CoP) terhadap *tip speed ratio* (λ) dengan silinder pengganggu dan tanpa silinder pengganggu pada bilangan Reynolds=97000. Pada grafik tersebut menunjukkan bahwa turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu menghasilkan *Coefficient of Power* (CoP) maksimum tertinggi sebesar 0,154 (15,4%) pada *tip speed ratio* 0,910 kemudian disusul dengan turbin dengan silinder pengganggu pada jarak $y/D=0,5$ yang memiliki nilai CoP maksimum sebesar 0,149 (14,9%) pada *tip speed ratio* 0,734. Silinder pengganggu

yang diletakkan pada jarak $y/D=0,25$ di depan *returning blade* menghasilkan CoP maksimum sebesar 0,096 (9,6%) pada *tip speed ratio* 0,552 sedangkan silinder pengganggu yang diletakkan pada $y/D=0$ menghasilkan CoP maksimum yang paling rendah yaitu sebesar 0,080 (8,0%) pada *tip speed ratio* 0,526.

Pemberian pengganggu berupa silinder di depan *returning blade* pada bilangan Reynolds=97000 diduga kurang efektif mengganggu *boundary layer* pada *returning blade* yang dapat meningkatkan momentum aliran di dekat *returning blade* dengan mempercepat transisi aliran dari laminar ke turbulen, sehingga gaya *drag* pada *returning blade* tidak berkurang secara signifikan. Selain itu, pemberian silinder pengganggu diduga kurang efektif menurunkan tekanan di depan *returning blade* yang dapat menurunkan selisih tekanan di depan dan di belakang *returning blade*. Akibatnya selisih gaya *drag* kedua sudu berkurang dan torsi yang dihasilkan berkurang sehingga CoP menjadi lebih rendah. Sedangkan dengan pemberian silinder pengganggu, nilai CoP terendah diperoleh pada jarak $y/D=0$ dimana hal ini terjadi karena dengan pemberian silinder pengganggu diduga dapat menghalangi aliran yang mengarah ke *advancing blade* sehingga aliran yang mengenai *advancing blade* berkurang. Akibatnya gaya *drag* pada *advancing blade* berkurang yang menyebabkan selisih gaya *drag* kedua sudu berkurang dan torsi yang dihasilkan berkurang sehingga CoP menjadi lebih rendah. Oleh karena itu, pemberian silinder pengganggu pada $S/D=1,8$ kurang efektif meningkatkan nilai CoP turbin angin Savonius pada bilangan Reynolds=97000.

4.3.2.2 Analisa Nilai *Coefficient of Power* (CoP) terhadap *Tip Speed Ratio* (λ) Turbin Angin Savonius Dengan Silinder Pengganggu pada Bilangan Reynolds=145000



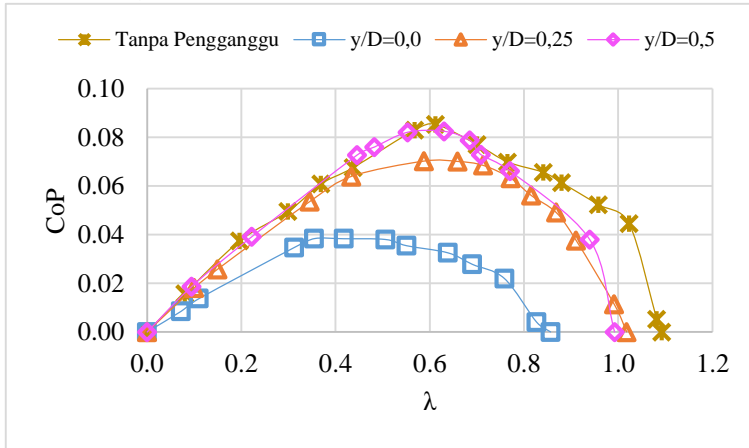
Gambar 4.9 Grafik *Coefficient of Power* (CoP) terhadap *tip speed ratio* (λ) turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu dan tanpa pengganggu pada bilangan Reynolds=145000

Gambar 4.9 menunjukkan grafik *Coefficient of Power* (CoP) terhadap *tip speed ratio* (λ) dengan silinder pengganggu dan tanpa silinder pengganggu pada bilangan Reynolds=145000. Pada grafik tersebut menunjukkan bahwa turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu menghasilkan *Coefficient of Power* (CoP) maksimum tertinggi sebesar 0,133 (13,3%) pada *tip speed ratio* 0,881 kemudian disusul dengan turbin dengan silinder pengganggu yang diletakkan pada jarak $y/D=0,25$ menghasilkan nilai CoP maksimum sebesar 0,096 (9,6%) pada *tip speed ratio* 0,784. Silinder pengganggu yang diletakkan pada jarak $y/D=0,5$ di depan *returning blade* menghasilkan CoP maksimum sebesar 0,083 (8,3%) pada *tip speed ratio* 0,706 sedangkan silinder pengganggu

yang diletakkan pada $y/D=0,0$ menghasilkan CoP maksimum yang paling rendah yaitu sebesar 0,077 (7,9%) pada *tip speed ratio* 0,547.

Pemberian pengganggu berupa silinder di depan *returning blade* pada bilangan Reynolds=145000 diduga kurang efektif mengganggu *boundary layer* pada *returning blade* yang dapat meningkatkan momentum aliran di dekat *returning blade* dengan mempercepat transisi aliran dari laminar ke turbulen, sehingga gaya *drag* pada *returning blade* tidak berkurang secara signifikan. Selain itu, pemberian silinder pengganggu diduga kurang efektif menurunkan tekanan di depan *returning blade* yang dapat menurunkan selisih tekanan di depan dan di belakang *returning blade*. Akibatnya selisih gaya *drag* kedua sudu berkurang dan torsi yang dihasilkan berkurang sehingga CoP menjadi lebih rendah. Sedangkan dengan pemberian silinder pengganggu, nilai CoP terendah diperoleh pada jarak $y/D=0,0$ dimana hal ini terjadi karena dengan pemberian silinder pengganggu diduga dapat menghalangi aliran yang mengarah ke *advancing blade* sehingga aliran yang mengenai *advancing blade* berkurang. Akibatnya gaya *drag* pada *advancing blade* berkurang yang menyebabkan selisih gaya *drag* kedua sudu berkurang dan torsi yang dihasilkan berkurang sehingga CoP menjadi lebih rendah. Oleh karena itu, pemberian silinder pengganggu pada $S/D=1,8$ kurang efektif meningkatkan nilai CoP turbin angin Savonius pada bilangan Reynolds=145000.

4.3.2.3 Analisa Nilai *Coefficient of Power* (CoP) terhadap *Tip Speed Ratio* (λ) Turbin Angin Savonius Dengan Silinder Pengganggu pada Bilangan Reynolds=178000



Gambar 4.10 Grafik *Coefficient of Power* (CoP) terhadap *tip speed ratio* (λ) turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu dan tanpa pengganggu pada bilangan Reynolds=178000

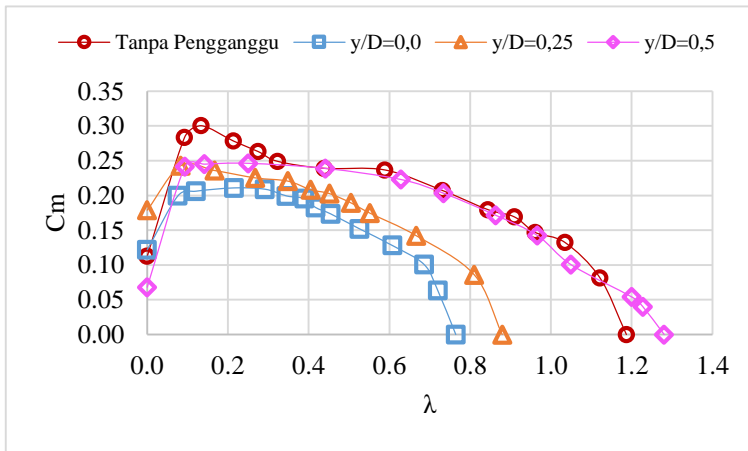
Gambar 4.10 menunjukkan grafik *Coefficient of Power* (CoP) terhadap *tip speed ratio* (λ) dengan silinder pengganggu dan tanpa silinder pengganggu pada bilangan Reynolds=178000. Pada grafik tersebut menunjukkan bahwa turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu menghasilkan *Coefficient of Power* (CoP) maksimum tertinggi sebesar 0,085 (8,5%) pada *tip speed ratio* 0,612 kemudian disusul dengan turbin dengan silinder pengganggu yang diletakkan pada jarak $y/D=0,5$ menghasilkan nilai CoP maksimum sebesar 0,082 (8,2%) pada *tip speed ratio* 0,631. Silinder pengganggu yang diletakkan pada jarak $y/D=0,25$ di depan *returning blade* menghasilkan CoP maksimum sebesar 0,070 (7,0%) pada *tip speed ratio* 0,659 sedangkan silinder pengganggu

yang diletakkan pada $y/D=0,0$ menghasilkan CoP maksimum yang paling rendah yaitu sebesar 0,038 (3,8%) pada *tip speed ratio* 0,506.

Pemberian pengganggu berupa silinder di depan *returning blade* pada bilangan Reynolds=178000 diduga kurang efektif mengganggu *boundary layer* pada *returning blade* yang dapat meningkatkan momentum aliran di dekat *returning blade* dengan mempercepat transisi aliran dari laminar ke turbulen, sehingga gaya *drag* pada *returning blade* tidak berkurang secara signifikan. Selain itu, pemberian silinder pengganggu diduga kurang efektif menurunkan tekanan di depan *returning blade* yang dapat menurunkan selisih tekanan di depan dan di belakang *returning blade*. Sehingga gaya *drag* pada *returning blade* tidak berkurang secara signifikan. Disisi lain, semakin tinggi bilangan Reynolds *boundary layer* pada *returning blade* berada dalam kondisi turbulen sehingga pemberian silinder pengganggu kurang efektif memberikan perubahan pada *boundary layer* tersebut tetapi akan menambah gaya gesek yang terjadi pada turbin tersebut. Sehingga, pengurangan gaya *drag* pada *returning blade* kurang efektif. Akibatnya selisih gaya *drag* kedua sudu berkurang dan torsi yang dihasilkan berkurang sehingga CoP menjadi lebih rendah. Sedangkan dengan pemberian silinder pengganggu, nilai CoP terendah diperoleh pada jarak $y/D=0,0$ dimana hal ini terjadi karena dengan pemberian silinder pengganggu diduga dapat menghalangi aliran yang mengarah ke *advancing blade* sehingga aliran yang mengenai *advancing blade* berkurang. Akibatnya gaya *drag* pada *advancing blade* berkurang dan selisih gaya *drag* kedua sudu berkurang yang menyebabkan torsi yang dihasilkan berkurang sehingga CoP menjadi lebih rendah. Oleh karena itu, pemberian silinder pengganggu pada $S/D=1,8$ kurang efektif meningkatkan nilai CoP turbin angin Savonius pada bilangan Reynolds=178000.

4.3.3 Analisa Nilai *Coefficient of Moment* (C_m) terhadap *Tip Speed Ratio* (λ) Turbin Angin Savonius Dengan Silinder Pengganggu

4.3.3.1 Analisa Nilai *Coefficient of Moment* (C_m) terhadap *Tip Speed Ratio* (λ) Turbin Angin Savonius Dengan Silinder Pengganggu pada Bilangan Reynolds=97000



Gambar 4.11 Grafik *Coefficient of Moment* (C_m) terhadap *tip speed ratio* (λ) turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu dan tanpa pengganggu pada bilangan Reynolds=97000

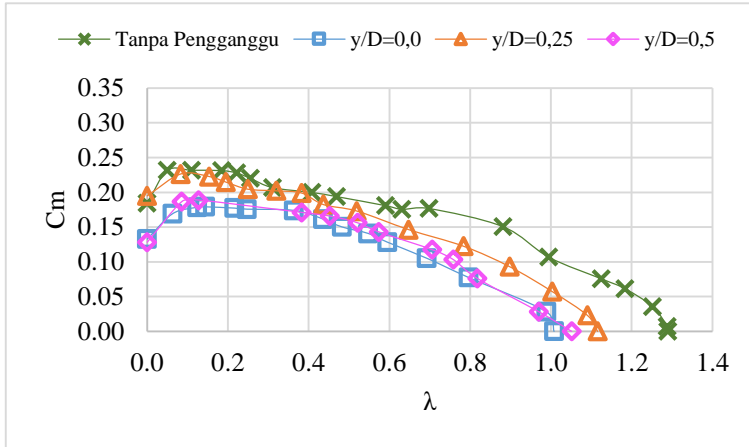
Gambar 4.11 merupakan grafik nilai *Coefficient of Moment* (C_m) terhadap *tip speed ratio* (λ) turbin angin Savonius dengan menvariasikan jarak y/D sebesar 0,0; 0,25; dan 0,5. Penelitian ini dilakukan dengan meletakkan silinder pengganggu $d/D=0,5$ di depan *returning blade* pada jarak $S/D=1,8$ dan pada bilangan Reynolds=97000.

Pada grafik tersebut menunjukkan bahwa turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu menghasilkan *Coefficient of Moment* (C_m) maksimum tertinggi sebesar 0,300 pada *tip speed*

ratio 0,134 kemudian disusul dengan turbin dengan silinder pengganggu pada jarak $y/D=0,5$ yang memiliki nilai C_m maksimum sebesar 0,246 pada *tip speed ratio* 0,250. Silinder pengganggu yang diletakkan pada jarak $y/D=0,25$ di depan *returning blade* menghasilkan C_m maksimum sebesar 0,243 pada *tip speed ratio* 0,083 sedangkan silinder pengganggu yang diletakkan pada $y/D=0,0$ menghasilkan C_m maksimum yang paling rendah yaitu sebesar 0,211 pada *tip speed ratio* 0,215.

Penempatan silinder pengganggu pada $y/D=0$ di depan *returning blade* menunjukkan nilai C_m maksimum yang lebih rendah dibandingkan dengan turbin angin tanpa silinder pengganggu. Hal ini terjadi karena dengan pemberian silinder pengganggu dapat menghalangi aliran yang mengarah ke *advancing blade* sehingga aliran yang mengenai *advancing blade* berkurang. Akibatnya gaya *drag* pada *advancing blade* berkurang. Selain itu, *shear layer* akibat pemberian silinder pengganggu pada $y/D=0,25$ dan 0,5 diduga kurang efektif memberi gangguan *boundary layer* pada *returning blade* dan kurang efektif menurunkan *pressure drag* pada *returning blade* sehingga gaya *drag* pada *returning blade* tidak berkurang secara signifikan. Akibatnya selisih gaya *drag* kedua sudu berkurang dan torsi yang dihasilkan oleh turbin berkurang sehingga C_m menjadi lebih rendah. Oleh karena itu, turbin angin pemberian silinder pengganggu di depan *returning blade* pada $S/D=1,8$ tidak efektif meningkatkan nilai C_m turbin angin Savonius pada bilangan Reynolds=97000.

4.3.3.2 Analisa Nilai *Coefficient of Moment* (C_m) terhadap *Tip Speed Ratio* (λ) Turbin Angin Savonius Dengan Silinder Pengganggu pada Bilangan Reynolds=145000



Gambar 4.12 Grafik *Coefficient of Moment* (C_m) terhadap *tip speed ratio* (λ) turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu dan tanpa pengganggu pada bilangan Reynolds=145000

Gambar 4.12 merupakan grafik nilai *Coefficient of Moment* (C_m) terhadap *tip speed ratio* (λ) turbin angin Savonius dengan bervariasi jarak y/D sebesar 0,0; 0,25; dan 0,5. Penelitian ini dilakukan dengan meletakkan silinder pengganggu $d/D=0,5$ di depan *returning blade* pada jarak $S/D=1,8$ dan pada bilangan Reynolds=145000.

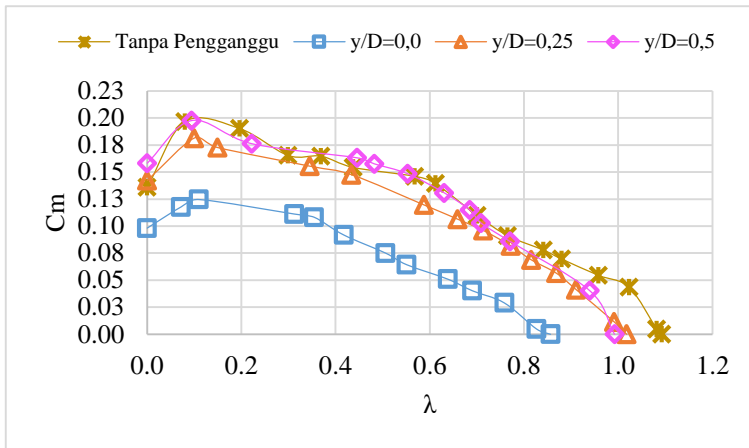
Pada grafik tersebut menunjukkan bahwa turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu menghasilkan *Coefficient of Moment* (C_m) maksimum tertinggi sebesar 0,232 pada *tip speed ratio* 0,050 kemudian disusul dengan turbin dengan silinder pengganggu yang diletakkan pada jarak $y/D=0,25$ menghasilkan nilai C_m maksimum sebesar 0,226 pada *tip speed ratio* 0,083.

Silinder pengganggu yang diletakkan pada jarak $y/D=0,5$ di depan *returning blade* menghasilkan C_m maksimum sebesar 0,189 pada *tip speed ratio* 0,128 sedangkan silinder pengganggu yang diletakkan pada $y/D=0,0$ menghasilkan C_m maksimum yang lebih rendah yaitu sebesar 0,179 pada *tip speed ratio* 0,144.

Penempatan silinder pengganggu pada $y/D=0,0$ di depan *returning blade* menunjukkan nilai C_m maksimum yang lebih rendah dibandingkan dengan turbin angin tanpa silinder pengganggu. Hal ini terjadi karena dengan pemberian silinder pengganggu dapat menghalangi aliran yang mengarah ke *advancing blade* sehingga aliran yang mengenai *advancing blade* berkurang. Akibatnya gaya *drag* pada *advancing blade* berkurang. Selain itu, *shear layer* akibat pemberian silinder pengganggu pada $y/D=0,25$ dan $0,5$ diduga kurang efektif memberi gangguan *boundary layer* pada *returning blade* dan kurang efektif menurunkan *pressure drag* pada *returning blade* sehingga gaya *drag* pada *returning blade* tidak berkurang secara signifikan. Akibatnya selisih gaya *drag* kedua sudu berkurang dan torsi yang dihasilkan oleh turbin berkurang sehingga C_m menjadi lebih rendah. Oleh karena itu, turbin angin pemberian silinder pengganggu di depan *returning blade* pada $S/D=1,8$ tidak efektif meningkatkan nilai C_m turbin angin Savonius pada bilangan Reynolds=145000.

4.3.3.3 Analisa Nilai Coefficient of Moment (C_m) terhadap Tip Speed Ratio (λ) Turbin Angin Savonius Dengan Silinder Pengganggu pada Bilangan Reynolds=178000

Gambar 4.13 merupakan grafik nilai *Coefficient of Moment* (C_m) terhadap *tip speed ratio* (λ) turbin angin Savonius dengan menvariasikan jarak y/D sebesar 0,0; 0,25; dan 0,5. Penelitian ini dilakukan dengan meletakkan silinder pengganggu $d/D=0,5$ di depan *returning blade* pada jarak $S/D=1,8$ dan pada bilangan Reynolds=178000.



Gambar 4.13 Grafik *Coefficient of Moment* (C_m) terhadap *tip speed ratio* (λ) turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu dan tanpa pengganggu pada bilangan Reynolds=178000

Pada grafik tersebut menunjukkan bahwa turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu menghasilkan *Coefficient of Moment* (C_m) maksimum tertinggi sebesar 0,197 pada *tip speed ratio* 0,080 kemudian disusul dengan turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu yang diletakkan pada $y/D=0,5$ menghasilkan *Coefficient of Moment* (C_m) sebesar 0,198 pada *tip speed ratio* 0,094. Silinder pengganggu yang diletakkan pada jarak $y/D=0,25$ di depan *returning blade* menghasilkan C_m maksimum sebesar 0,181 pada *tip speed ratio* 0,100 sedangkan silinder pengganggu yang diletakkan pada $y/D=0,0$ menghasilkan C_m maksimum yang paling rendah yaitu sebesar 0,125 pada *tip speed ratio* 0,110.

Penempatan silinder pengganggu pada $y/D=0$ di depan *returning blade* menunjukkan nilai C_m maksimum yang lebih rendah dibandingkan dengan turbin angin tanpa silinder pengganggu. Hal ini terjadi karena dengan pemberian silinder pengganggu dapat menghalangi aliran yang mengarah ke

advancing blade sehingga aliran yang mengenai *advancing blade* berkurang. Akibatnya gaya *drag* pada *advancing blade* berkurang. Selain itu, *shear layer* akibat pemberian silinder pengganggu pada $y/D=0,25$ dan $0,5$ diduga kurang efektif memberi gangguan *boundary layer* pada *returning blade* dan kurang efektif menurunkan *pressure drag* pada *returning blade* sehingga gaya *drag* pada *returning blade* tidak berkurang secara signifikan. Akibatnya selisih gaya *drag* kedua sudu berkurang dan torsi yang dihasilkan oleh turbin berkurang sehingga C_m menjadi lebih rendah. Oleh karena itu, turbin angin pemberian silinder pengganggu di depan *returning blade* pada $S/D=1,8$ tidak efektif meningkatkan nilai C_m turbin angin Savonius pada bilangan Reynolds=178000.

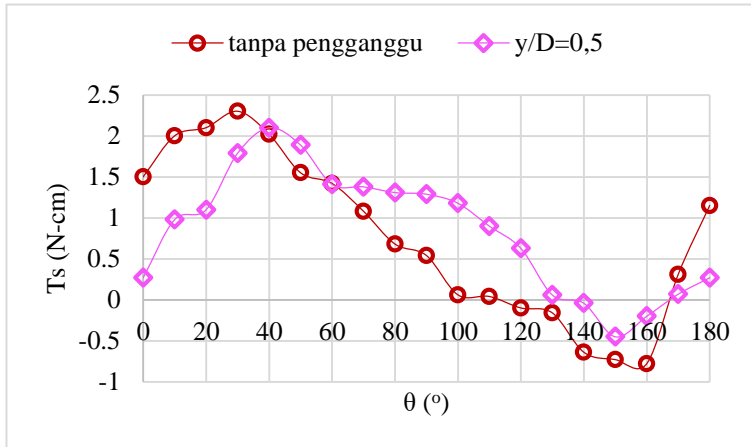
4.3.4 Analisa Nilai Torsi Statis (T_s) terhadap Posisi angular sudu (θ) Turbin Angin Savonius Dengan Silinder Pengganggu pada $y/D=0,5$

4.3.4.1 Analisa Nilai Torsi Statis (T_s) terhadap Posisi angular sudu (θ) Turbin Angin Savonius Dengan Silinder Pengganggu pada Bilangan Reynolds=97000

Gambar 4.14 merupakan grafik torsi statis (T_s) turbin angin Savonius terhadap posisi angular sudu (θ) dengan bervariasi ada tidaknya silinder penghalang di depan *returning blade* dimana posisi angular sudu (θ) dimulai pada sudut 0° (sudu searah dengan aliran) sampai dengan 180° dengan kenaikan 10° pada bilangan Reynolds=97000. Pada pengukuran torsi statis dengan silinder pengganggu menggunakan silinder pengganggu pada jarak $S/D=1,8$ dan $y/D=0,5$ dikarenakan pada $y/D=0,5$ dapat menghasilkan peningkatan nilai CoP turbin angin Savonius tertinggi.

Berdasarkan grafik diatas, torsi statis turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu menghasilkan torsi statis maksimum sebesar 2,3 N-cm pada posisi angular sudu (θ) 30°

sedangkan torsi statis minimum sebesar $-0,78$ N-cm pada posisi angular sudu (θ) 160° . Pengukuran torsi statis turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada $y/D=0,5$ menghasilkan torsi statis maksimum sebesar $2,1$ N-cm pada posisi angular sudu (θ) 40° sedangkan torsi minimum sebesar $-0,45$ N-cm pada sudut 150° .



Gambar 4.14 Grafik torsi statis (T_s) terhadap posisi angular sudu (θ) turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu dan dengan silinder pengganggu $y/D=0,5$ pada bilangan Reynolds=97000

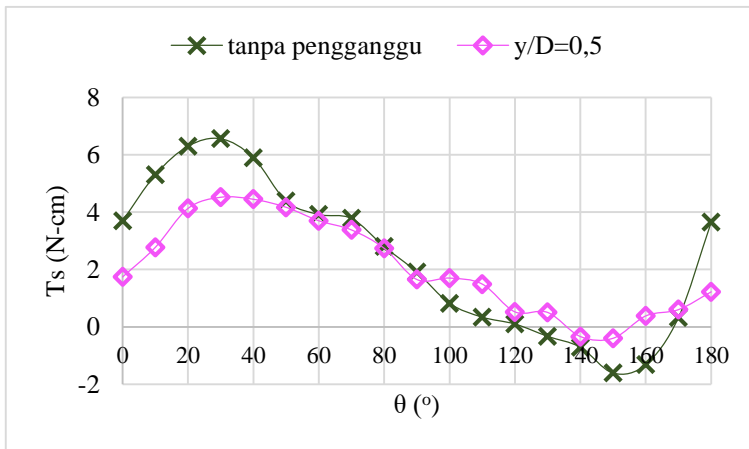
Gambar 4.14 menunjukkan bahwa pemberian silinder pengganggu pada bilangan Reynolds=97000 dengan jarak $y/D=0,5$ dapat menggeser posisi angular sudu pada torsi maksimum dan meningkatkan torsi statis turbin angin Savonius sebesar 3,96% pada posisi angular sudu (θ) 40° . Pemberian silinder pengganggu tersebut diduga dapat mengurangi gaya *drag* yang terjadi pada *returning blade*. Hal ini terjadi karena *shear layer* silinder pengganggu diduga dapat mempercepat transisi *boundary layer* dari laminar ke turbulen dan momentum aliran di dekat *returning blade* semakin besar sehingga mampu menahan *adverse pressure*

gradient dan gaya gesek yang terjadi. Akibatnya, titik separasi pada *returning blade* dapat ditunda dan daerah *wake* dibelakang *returning blade* semakin kecil. Oleh karena itu, gaya *drag* pada *returning blade* semakin kecil dan menyebabkan selisih gaya *drag* kedua sudu meningkat sehingga dibutuhkan torsi yang lebih besar untuk menahan putaran angin Savonius. Disisi lain, pemberian silinder pengganggu di depan *returning blade* diduga dapat menyebabkan tekanan di depan *returning blade* turun, sedangkan tekanan di belakang *returning blade* diasumsikan sama seperti tidak menggunakan silinder pengganggu. Sehingga *pressure drag* yang mengakibatkan selisih tekanan antara di depan dan di belakang *returning blade* menurun. Akibatnya selisih gaya *drag* antara *returning blade* dan *advancing blade* semakin besar sehingga dibutuhkan torsi yang lebih besar untuk menahan putaran turbin angin Savonius.

Pada posisi angular sudu (θ) 30° (tanpa silinder pengganggu) dan 40° (dengan silinder pengganggu) diperoleh torsi statis maksimum karena pada posisi posisi angular sudu tersebut, *advancing blade* diduga menerima gaya *drag* lebih tinggi yang menyebabkan torsi positif semakin bertambah dan perbedaan torsi pada kedua sudu lebih besar sehingga dibutuhkan torsi yang besar untuk menggerakkan turbin, sedangkan pada posisi angular sudu (θ) 150° (tanpa silinder pengganggu) dan 160° (dengan silinder pengganggu) diperoleh torsi statis minimum karena pada posisi posisi angular sudu tersebut, *advancing blade* menerima gaya *drag* yang lebih rendah yang menyebabkan torsi positif berkurang dan perbedaan torsi pada kedua sudu lebih kecil sehingga dibutuhkan torsi yang kecil untuk menggerakkan turbin. Nilai negatif pada torsi statis menunjukkan bahwa gaya *drag* pada *returning blade* lebih besar dibandingkan dengan gaya *drag* pada *advancing blade* sehingga perbedaan gaya *drag* kedua sudu menghasilkan torsi negatif yang berputar berlawanan dengan arah turbin. Sehingga, nilai negatif tersebut menunjukkan kemampuan *self starting* turbin angin Savonius yang rendah pada posisi angular sudu (θ) 150° (tanpa silinder pengganggu) dan 160° (dengan silinder

pengganggu) dimana turbin dengan silinder pengganggu memiliki kemampuan *self starting* yang lebih baik. Oleh karena itu, pemberian silinder pengganggu didepan *returning blade* dengan jarak $S/D=1,8$ dan $y/D=0,5$ pada bilangan Reynolds=97000 secara efektif dapat meningkatkan torsi statis turbin angin Savonius.

4.3.4.2 Analisa Nilai Torsi Statis (T_s) terhadap Posisi angular sudu (θ) Turbin Angin Savonius Dengan Silinder Pengganggu pada Bilangan Reynolds=145000



Gambar 4.15 Grafik torsi statis (T_s) terhadap posisi angular sudu (θ) turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu dan dengan silinder pengganggu $y/D=0,5$ pada bilangan Reynolds=145000

Gambar 4.15 merupakan grafik torsi statis (T_s) turbin angin Savonius terhadap posisi angular sudu (θ) dengan bervariasi ada tidaknya silinder penghalang di depan *returning blade* dimana posisi angular sudu (θ) dimulai pada sudut 0° (sudu searah dengan aliran) sampai dengan 180° dengan kenaikan 10°

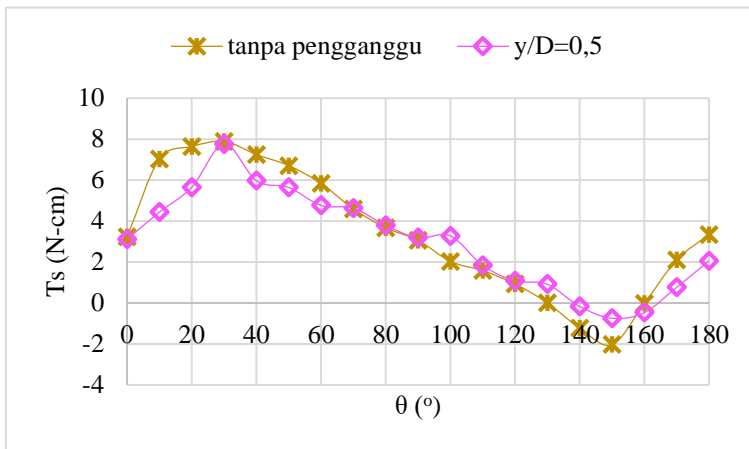
pada bilangan Reynolds=145000. Pada pengukuran torsi statis dengan silinder pengganggu menggunakan silinder pengganggu pada jarak $S/D=1,8$ dan $y/D=0,5$ dikarenakan pada $y/D=0,5$ dapat menghasilkan peningkatan nilai CoP turbin angin Savonius tertinggi.

Berdasarkan gambar 4.15, torsi statis turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu menghasilkan torsi statis maksimum sebesar 6,56 N-cm pada posisi angular sudu (θ) 30° sedangkan torsi statis minimum sebesar -1,61 N-cm pada posisi angular sudu (θ) 150° . Pengukuran torsi statis turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada $y/D=0,5$ menghasilkan torsi statis maksimum sebesar 4,52 N-cm pada posisi angular sudu (θ) 30° sedangkan torsi minimum sebesar -0,4 N-cm pada posisi angular sudu (θ) 150° .

Gambar 4.15 menunjukkan bahwa torsi statis maksimum tertinggi pada bilangan Reynolds=145000 terjadi pada turbin angin tanpa silinder pengganggu dengan jarak $y/D=0,5$. Hal ini terjadi karena pada bilangan Reynolds yang tinggi, *boundary layer* pada *returning blade* berada dalam kondisi turbulen sehingga pemberian silinder pengganggu kurang efektif memberikan perubahan pada *boundary layer* tersebut tetapi akan menambah gaya gesek yang terjadi pada turbin tersebut. Sehingga, pengurangan gaya *drag* pada *returning blade* kurang efektif. Pada posisi angular sudu (θ) 30° diperoleh torsi statis maksimum karena pada posisi angular sudu tersebut, *advancing blade* diduga menerima gaya *drag* lebih tinggi yang menyebabkan torsi positif semakin bertambah dan perbedaan torsi pada kedua sudu lebih besar sehingga dibutuhkan torsi yang besar untuk menggerakkan turbin, sedangkan pada posisi angular sudu (θ) 150° diperoleh torsi statis minimum karena pada posisi angular sudu tersebut, *advancing blade* menerima gaya *drag* yang lebih rendah yang menyebabkan torsi positif berkurang dan perbedaan torsi pada kedua sudu lebih kecil sehingga dibutuhkan torsi yang kecil untuk menggerakkan turbin. Nilai negatif pada torsi statis menunjukkan bahwa gaya *drag* pada *returning blade* lebih besar dibandingkan dengan gaya *drag* pada

advancing blade sehingga perbedaan gaya *drag* kedua sudu menghasilkan torsi negatif yang berputar berlawanan dengan arah turbin. Sehingga, nilai negatif tersebut menunjukkan kemampuan *self starting* turbin angin Savonius yang rendah pada posisi angular sudu (θ) 150° dimana turbin dengan silinder pengganggu memiliki kemampuan *self starting* yang lebih baik. Oleh karena itu, pemberian silinder pengganggu didepan *returning blade* dengan jarak $S/D=1,8$ dan $y/D=0,5$ pada bilangan Reynolds=145000 tidak efektif meningkatkan torsi statis turbin angin Savonius.

4.3.4.3 Analisa Nilai Torsi Statis (T_s) terhadap Posisi angular sudu (θ) Turbin Angin Savonius Dengan Silinder Pengganggu pada Bilangan Reynolds=178000



Gambar 4.16 Grafik torsi statis (T_s) terhadap posisi angular sudu (θ) turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu dan dengan silinder pengganggu $y/D=0,5$ pada bilangan Reynolds=178000

Gambar 4.16 merupakan grafik torsi statis (T_s) turbin angin Savonius terhadap posisi angular sudu (θ) dengan bervariasi ada tidaknya silinder penghalang di depan *returning blade* dimana posisi angular sudu (θ) dimulai pada sudut 0° (sudu searah dengan aliran) sampai dengan 180° dengan kenaikan 10° pada bilangan Reynolds=178000. Pada pengukuran torsi statis dengan silinder pengganggu menggunakan silinder pengganggu pada jarak $S/D=1,8$ dan $y/D=0,5$ dikarenakan pada $y/D=0,5$ dapat menghasilkan peningkatan nilai CoP turbin angin Savonius tertinggi.

Berdasarkan gambar 4.16, torsi statis turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu menghasilkan torsi statis maksimum sebesar 7,88 N-cm pada posisi angular sudu (θ) 30° sedangkan torsi statis minimum sebesar -2,03 N-cm pada posisi angular sudu (θ) 150° . Pengukuran torsi statis turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada $y/D=0,5$ menghasilkan torsi statis maksimum sebesar 7,76 N-cm pada posisi angular sudu (θ) 30° sedangkan torsi minimum sebesar -0,74 N-cm pada posisi angular sudu (θ) 150° .

Gambar 4.15 menunjukkan bahwa torsi statis maksimum tertinggi pada bilangan Reynolds=178000 terjadi pada turbin angin tanpa silinder pengganggu dengan jarak $y/D=0,5$. Hal ini terjadi karena pada bilangan Reynolds yang tinggi, *boundary layer* pada *returning blade* berada dalam kondisi turbulen sehingga pemberian silinder pengganggu kurang efektif memberikan perubahan pada *boundary layer* tersebut tetapi akan menambah gaya gesek yang terjadi pada turbin tersebut. Sehingga, pengurangan gaya *drag* pada *returning blade* kurang efektif. Pada posisi angular sudu (θ) 30° diperoleh torsi statis maksimum karena pada posisi angular sudu tersebut, *advancing blade* diduga menerima gaya *drag* lebih tinggi yang menyebabkan torsi positif semakin bertambah dan perbedaan torsi pada kedua sudu lebih besar sehingga dibutuhkan torsi yang besar untuk menggerakkan turbin, sedangkan pada posisi angular sudu (θ) 150° diperoleh torsi statis minimum karena pada posisi angular sudu tersebut, *advancing blade*

menerima gaya *drag* yang lebih rendah yang menyebabkan torsi positif berkurang dan perbedaan torsi pada kedua sudu lebih kecil sehingga dibutuhkan torsi yang kecil untuk menggerakkan turbin. Nilai negatif pada torsi statis menunjukkan bahwa gaya *drag* pada *returning blade* lebih besar dibandingkan dengan gaya *drag* pada *advancing blade* sehingga perbedaan gaya *drag* kedua sudu menghasilkan torsi negatif yang berputar berlawanan dengan arah turbin. Sehingga, nilai negatif tersebut menunjukkan kemampuan *self starting* turbin angin Savonius yang rendah pada posisi angular sudu (θ) 150° dimana turbin dengan silinder pengganggu memiliki kemampuan *self starting* yang lebih baik. Oleh karena itu, pemberian silinder pengganggu didepan *returning blade* dengan jarak $S/D=1,8$ dan $y/D=0,5$ pada bilangan Reynolds=178000 tidak efektif meningkatkan torsi statis turbin angin Savonius.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Pada penelitian ini dengan menempatkan silinder pengganggu $d/D=0,5$ di depan *returning blade* turbin angin Savonius pada jarak $S/D=1,8$ dengan variasi $y/D=0,0; 0,25; \text{ dan } 0,5$ dan bilangan Reynolds=97000, 145000 dan 178000 diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut.

1. Pemberian silinder pengganggu pada jarak $y/D=0,0$ dan $0,25$ tidak efektif meningkatkan putaran turbin angin Savonius, sedangkan pada $y/D=0,5$ pemberian silinder pengganggu secara efektif meningkatkan putaran turbin angin Savonius sebesar 7,85% pada bilangan Reynolds=97000.
2. Pada bilangan Reynolds=97000, 145000, dan 178000, pemberian silinder pengganggu pada jarak $y/D=0,0; 0,25$ dan $0,5$ tidak efektif meningkatkan *Coefficient of Power* (CoP) turbin angin Savonius.
3. Pada bilangan Reynolds=97000, 145000, dan 178000, pemberian silinder pengganggu pada jarak $y/D=0,0; 0,25$ dan $0,5$ tidak efektif meningkatkan *Coefficient of Moment* (Cm) turbin angin Savonius.
4. Pemberian silinder pengganggu pada jarak $y/D=0,5$ secara efektif dapat meningkatkan torsi statis sebesar 3,96% pada bilangan Reynolds=97000 sedangkan pada bilangan Reynolds=145000 dan 178000 tidak efektif meningkatkan torsi statis turbin angin Savonius.

5.2 Saran

Adapun saran mengenai penelitian yang telah dilakukan adalah sebagai berikut.

1. Pemilihan benang pada *brake dynamometer* yang lebih kuat dan kaku karena rawan terjadinya *slip* antara poros dan benang.
2. Pengambilan data yang dilakukan pada suatu ruangan tertutup dimana kondisi udara dapat diatur
3. Memperbaiki rigiditas dari penyangga turbin angin Savonius untuk meminimalisir getaran yang terjadi

DAFTAR PUSTAKA

- Altan, B.D., Atilgan, M., dan Ozdamar, A. 2008. *An Experimental Study on Improvement of a Savonius Rotor Performance with Curtaining*. Experimental Thermal and Fluid Science 32 (2008) 1673–1678.
- Brar, J.S. dan Bansal, R.K. 2004. *Theory of Machines*. New Delhi: Firewall Media.
- Dewan Energi Nasional. 2014. *Outlook Energi Indonesia*. Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. Jakarta.
- Pradhito, Arnoldus Adro. 2016. *Studi Eksperimen Pengaruh Silinder Sirkular Sebagai Pengganggu Aliran Di Depan Sisi Returning Blade Terhadap Performa Turbin Angin Tipe Savonius*. “Studi kasus untuk perbandingan $d/D = 0,5$; $S/D = 1,5 \leq S/D \leq 2,4$; Bilangan Reynolds = 3×10^4 , 6×10^4 , dan 9×10^4 ”. Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Surabaya.
- Fox R.W., McDonald A.T., dan Pritchard P.J. 2011. *Introduction to Fluid Mechanics 8th edition*. New York City: John Wiley & Sons Inc.
- Kompas GSA. 2017. *Pengembangan Energi Angin Memungkinkan*. Akses 30 November 2017. <http://www.energi.lipi.go.id/utama.cgi?cetakartikel&1177294977>.
- Loehrke, R.I, dan Nagib, H.M. 1972. *Experiments on Management of Free Stream Turbulance*. Advisory Group for Aerospace Research and Development.
- Mahmood, Muhammad Aslam Bhutta, Hayat Nasir, Uzair, Ahmed Farooq, Zain, Ali, Rehan, Sh. Jamil, dan Hussain, Zahid. 2012. *Vertical Axis Wind Turbine –A Review of Various Configurasions and Design Technique*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 16 (2012) 1926–1939.
- Mohamed, M.H., Janiga, G., Pap, E., dan Thévenin, D. 2010. *Optimization of Savonius Turbines Using an Obstacle Shielding the Returning Blade*. Renewable Energy 35 (2010) 2618-2626.

- Moh., Magedi M. Saad dan Asmuin, Norzelawati. 2014. ***Comparison of Horizontal Axis Wind Turbines and Vertical Axis Wind Turbines***. IOSR Journal of Engineering (IOSRJEN) Vol. 04, Issue 08 (August. 2014), ||V2|| PP 27-30.
- N.H. Mahmoud, EL-Haroun, A.A, Wahba, E, dan Nasef, M.H. 2012. ***An Experimental Study on Improvement of Savonius Rotor Performance***. Alexandria Engineering Journal (2012) 51, 91-25.
- U.S. Energy Information Administration. 2017. ***Wind Explained: History of Wind Power***. Akses 25 Desember 2017. https://www.eia.gov/energyexplained/index.cfm?page=wind_history.
- Wenehenubun, Frederikus, Saputra, Andy, dan Susanto, Hadi. 2015. ***An Experimental Study On the Performance of Savonius Wind Turbines Related with The Number of Blades***. Energy Procedia 68 (2015) 297 – 304
- Tsutsui dan Igarashi. 2002. ***Drag Reduction of a Circular Cylinder in an Air Stream***. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 527-541.
- Triyogi Y., D, Suprayogi, dan E, Spirda. 2009. ***Reducing the Drag on a Circular Cylinder by Upstream Installation of an I-Type Bluff Body as Passive Control***. Proc. IMechE Vol. 223 Part C: J. Mechanical Engineering Science.
- Triyogi Y., Abdul Latip, Nabila P., Muhammad U., Erik Noer M., Citro A., Ulfah A., Anas F., Wawan Aries W., dan Bambang Arip D. 2018. ***The Effect of Width of Single Curtain on The Performance of Savonius Wind Turbine***. AIP Conference Proceedings, Vol 1983, Issue 1, 2018, pp. 020023-1-020023-5.
- Triyogi Y., Abdul Latip, Nabila P., Muhammad U., Erik Noer M., Citro A., Ulfah A., dan Anas F. 2018. ***Numerical Study on The Effect of Width of Single Curtain on the Performance of Savonius Wind Turbine***. Matec Web of Conference, Vol 154, 01110 (2018), pp.1-3.

LAMPIRAN

Tabel A.1 Data penelitian turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu pada bilangan Reynolds=97000

T (°C)	V (m/s)	n (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	λ	T (Nm)	CoP	Cm
28,2	5,01	374,57	39,20	0	0,000	0,0095	0,08932	1,1772	1,187	0,000	0,000	0,000
28,2	5,01	353,90	37,04	15	190,000	0,0095	0,08932	1,1772	1,122	0,016	0,091	0,081
28,2	5,01	326,70	34,19	16	300,000	0,0095	0,08932	1,1772	1,035	0,026	0,137	0,132
28,2	5,01	303,35	31,75	18	333,333	0,0095	0,08932	1,1772	0,961	0,029	0,141	0,147
28,2	5,01	287,01	30,04	20	383,333	0,0095	0,08932	1,1772	0,910	0,034	0,154	0,169
28,2	5,01	266,39	27,88	25	410,667	0,0095	0,08932	1,1772	0,844	0,036	0,152	0,180
28,2	5,01	230,75	24,15	35	480,000	0,0095	0,08932	1,1772	0,731	0,041	0,151	0,207
28,2	5,01	185,89	19,46	45	553,333	0,0095	0,08932	1,1772	0,589	0,047	0,139	0,237
28,2	5,01	138,47	14,49	50	563,333	0,0095	0,08932	1,1772	0,439	0,048	0,105	0,239
28,2	5,01	101,94	10,67	65	600,000	0,0095	0,08932	1,1772	0,323	0,050	0,080	0,249
28,2	5,01	86,85	9,09	85	650,000	0,0095	0,08932	1,1772	0,275	0,053	0,072	0,263
28,2	5,01	67,46	7,06	105	702,667	0,0095	0,08932	1,1772	0,214	0,056	0,059	0,278
28,2	5,01	42,27	4,42	155	800,000	0,0095	0,08932	1,1772	0,134	0,060	0,040	0,300
28,2	5,01	29,13	3,05	175	783,333	0,0095	0,08932	1,1772	0,092	0,057	0,026	0,283
28,2	5,01	0,00	0,00	185	426,667	0,0095	0,08932	1,1772	0,000	0,023	0,000	0,113

Tabel A.2 Data penelitian turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu pada bilangan Reynolds=145000

T (°C)	V (m/s)	n (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	λ	T (Nm)	CoP	Cm
28	7,5	609,20	63,76	0	0,000	0,0095	0,08932	1,1772	1,290	0,000	0,000	0,000
28	7,5	608,43	63,68	15	50,000	0,0095	0,08932	1,1772	1,288	0,003	0,009	0,007
28	7,5	591,25	61,88	35	206,667	0,0095	0,08932	1,1772	1,252	0,016	0,045	0,036
28	7,5	558,83	58,49	55	351,333	0,0095	0,08932	1,1772	1,183	0,028	0,073	0,062
28	7,5	531,25	55,60	75	439,333	0,0095	0,08932	1,1772	1,125	0,034	0,085	0,076
28	7,5	469,69	49,16	95	609,333	0,0095	0,08932	1,1772	0,994	0,048	0,106	0,107
28	7,5	416,36	43,58	115	840,000	0,0095	0,08932	1,1772	0,881	0,068	0,133	0,151
28	7,5	329,83	34,52	155	1006,000	0,0095	0,08932	1,1772	0,698	0,079	0,123	0,177
28	7,5	298,18	31,21	175	1020,000	0,0095	0,08932	1,1772	0,631	0,079	0,111	0,176
28	7,5	278,75	29,18	195	1066,000	0,0095	0,08932	1,1772	0,590	0,081	0,107	0,181
28	7,5	221,57	23,19	215	1148,667	0,0095	0,08932	1,1772	0,469	0,087	0,091	0,194
28	7,5	192,91	20,19	235	1197,000	0,0095	0,08932	1,1772	0,408	0,090	0,082	0,200
28	7,5	146,65	15,35	255	1250,667	0,0095	0,08932	1,1772	0,310	0,093	0,064	0,207
28	7,5	120,78	12,64	275	1334,667	0,0095	0,08932	1,1772	0,256	0,099	0,056	0,220
28	7,5	104,76	10,96	295	1392,000	0,0095	0,08932	1,1772	0,222	0,102	0,051	0,228
28	7,5	87,07	9,11	315	1428,667	0,0095	0,08932	1,1772	0,184	0,104	0,043	0,231
28	7,5	52,07	5,45	335	1451,000	0,0095	0,08932	1,1772	0,110	0,104	0,026	0,232
28	7,5	23,66	2,48	375	1490,000	0,0095	0,08932	1,1772	0,050	0,104	0,012	0,232
28	7,5	0,00	0,00	385	1273,333	0,0095	0,08932	1,1772	0,000	0,083	0,000	0,185

Tabel A.3 Data penelitian turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu pada bilangan Reynolds=178000

T (°C)	V (m/s)	n (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	λ	T (Nm)	CoP	Cm
28,2	9,2	632,86	66,24	0	0,000	0,0095	0,08932	1,1772	1,092	0,000	0,000	0,000
28,2	9,2	626,90	65,62	15	50,000	0,0095	0,08932	1,1772	1,082	0,003	0,005	0,005
28,2	9,2	592,91	62,06	35	350,000	0,0095	0,08932	1,1772	1,023	0,029	0,045	0,043
28,2	9,2	555,20	58,11	55	450,000	0,0095	0,08932	1,1772	0,958	0,037	0,052	0,055
28,2	9,2	509,67	53,35	95	600,000	0,0095	0,08932	1,1772	0,880	0,047	0,061	0,070
28,2	9,2	487,25	51,00	115	680,000	0,0095	0,08932	1,1772	0,841	0,053	0,066	0,078
28,2	9,2	443,43	46,41	155	816,000	0,0095	0,08932	1,1772	0,765	0,062	0,070	0,091
28,2	9,2	405,77	42,47	195	991,667	0,0095	0,08932	1,1772	0,700	0,074	0,077	0,110
28,2	9,2	354,57	37,11	215	1225,000	0,0095	0,08932	1,1772	0,612	0,094	0,085	0,139
28,2	9,2	329,16	34,45	235	1293,333	0,0095	0,08932	1,1772	0,568	0,099	0,083	0,146
28,2	9,2	253,45	26,53	255	1373,333	0,0095	0,08932	1,1772	0,437	0,104	0,068	0,154
28,2	9,2	213,88	22,39	275	1468,333	0,0095	0,08932	1,1772	0,369	0,111	0,061	0,165
28,2	9,2	173,35	18,14	295	1493,333	0,0095	0,08932	1,1772	0,299	0,112	0,049	0,165
28,2	9,2	113,89	11,92	355	1733,333	0,0095	0,08932	1,1772	0,197	0,128	0,037	0,190
28,2	9,2	46,35	4,85	395	1820,000	0,0095	0,08932	1,1772	0,080	0,133	0,016	0,197
28,2	9,2	0,00	0,00	415	1400,000	0,0095	0,08932	1,1772	0,000	0,092	0,000	0,136

Tabel A.4 Data penelitian turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada jarak $y/D=0$ pada bilangan Reynolds=97000

T (°C)	V (m/s)	n (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	λ	T (Nm)	CoP	Cm
31	5,01	241,34	25,26	0	0,000	0,01	0,0893	1,1686	0,7649	0,0000	0,0000	0,0000
31	5,01	227,25	23,79	15	150,000	0,01	0,0893	1,1686	0,7202	0,0126	0,0456	0,0633
31	5,01	216,50	22,66	25	240,000	0,01	0,0893	1,1686	0,6861	0,0200	0,0692	0,1008
31	5,01	191,72	20,07	35	308,000	0,01	0,0893	1,1686	0,6076	0,0254	0,0778	0,1280
31	5,01	166,09	17,38	45	369,000	0,01	0,0893	1,1686	0,5264	0,0302	0,0800	0,1519
31	5,01	143,49	15,02	55	425,000	0,01	0,0893	1,1686	0,4548	0,0345	0,0789	0,1735
31	5,01	131,67	13,78	65	454,667	0,01	0,0893	1,1686	0,4173	0,0363	0,0763	0,1827
31	5,01	123,07	12,88	75	492,000	0,01	0,0893	1,1686	0,3900	0,0389	0,0763	0,1956
31	5,01	109,08	11,42	85	510,000	0,01	0,0893	1,1686	0,3457	0,0396	0,0689	0,1993
31	5,01	92,11	9,64	95	540,667	0,01	0,0893	1,1686	0,2919	0,0415	0,0610	0,2090
31	5,01	67,93	7,11	105	554,667	0,01	0,0893	1,1686	0,2153	0,0419	0,0454	0,2109
31	5,01	38,37	4,02	115	554,667	0,01	0,0893	1,1686	0,1216	0,0410	0,0251	0,2062
31	5,01	24,07	2,52	125	550,667	0,01	0,0893	1,1686	0,0763	0,0397	0,0152	0,1996
31	5,01	0,00	0,00	165	425,000	0,01	0,0893	1,1686	0,0000	0,0242	0,0000	0,1219

Tabel A.5 Data penelitian turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada jarak $y/D=0$ pada bilangan Reynolds=145000

T (°C)	V (m/s)	n (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	λ	T (Nm)	CoP	Cm
31	7,5	476,14	49,84	0	0,000	0,0095	0,0893	1,1686	1,008	0,000	0,000	0,000
31	7,5	467,25	48,91	15	150,000	0,0095	0,0893	1,1686	0,989	0,013	0,028	0,028
31	7,5	376,15	39,37	35	405,333	0,0095	0,0893	1,1686	0,796	0,035	0,062	0,077
31	7,5	327,33	34,26	55	557,333	0,0095	0,0893	1,1686	0,693	0,047	0,073	0,105
31	7,5	281,11	29,42	95	708,000	0,0095	0,0893	1,1686	0,595	0,057	0,076	0,128
31	7,5	258,59	27,07	115	788,000	0,0095	0,0893	1,1686	0,547	0,063	0,077	0,141
31	7,5	227,89	23,85	135	852,667	0,0095	0,0893	1,1686	0,482	0,067	0,072	0,150
31	7,5	205,78	21,54	155	927,000	0,0095	0,0893	1,1686	0,436	0,072	0,070	0,162
31	7,5	171,95	18,00	215	1046,000	0,0095	0,0893	1,1686	0,364	0,077	0,063	0,174
31	7,5	116,88	12,23	235	1074,667	0,0095	0,0893	1,1686	0,247	0,078	0,043	0,176
31	7,5	102,01	10,68	255	1102,000	0,0095	0,0893	1,1686	0,216	0,079	0,038	0,177
31	7,5	68,25	7,14	295	1150,667	0,0095	0,0893	1,1686	0,144	0,080	0,026	0,179
31	7,5	58,57	6,13	315	1167,333	0,0095	0,0893	1,1686	0,124	0,079	0,022	0,178
31	7,5	29,81	3,12	395	1204,000	0,0095	0,0893	1,1686	0,063	0,075	0,011	0,169
31	7,5	0,00	0,00	415	1049,333	0,0095	0,0893	1,1686	0,000	0,059	0,000	0,133

Tabel A.6 Data penelitian turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada jarak $y/D=0$ pada bilangan Reynolds=178000

T (°C)	V (m/s)	n (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	λ	T (Nm)	CoP	Cm
29	9,1	490,95	51,39	0	0,000	0,0095	0,0893	1,1756	0,857	0,000	0,000	0,000
29	9,1	473,85	49,60	15	50,000	0,0095	0,0893	1,1756	0,827	0,003	0,004	0,005
29	9,1	434,79	45,51	35	240,000	0,0095	0,0893	1,1756	0,759	0,019	0,022	0,029
29	9,1	395,71	41,42	65	350,000	0,0095	0,0893	1,1756	0,690	0,027	0,028	0,040
29	9,1	366,09	38,32	95	455,333	0,0095	0,0893	1,1756	0,639	0,034	0,033	0,051
29	9,1	315,93	33,07	145	600,000	0,0095	0,0893	1,1756	0,551	0,042	0,035	0,064
29	9,1	290,00	30,35	155	686,667	0,0095	0,0893	1,1756	0,506	0,050	0,038	0,075
29	9,1	239,36	25,05	185	834,333	0,0095	0,0893	1,1756	0,418	0,061	0,038	0,092
29	9,1	203,27	21,28	205	970,667	0,0095	0,0893	1,1756	0,355	0,071	0,038	0,108
29	9,1	179,03	18,74	225	1011,667	0,0095	0,0893	1,1756	0,312	0,073	0,035	0,111
29	9,1	63,06	6,60	335	1216,667	0,0095	0,0893	1,1756	0,110	0,082	0,014	0,125
29	9,1	41,23	4,32	375	1208,333	0,0095	0,0893	1,1756	0,072	0,078	0,008	0,118
29	9,1	0,00	0,00	455	1150,000	0,0095	0,0893	1,1756	0,000	0,065	0,000	0,098

Tabel A.7 Data penelitian turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada jarak $y/D=0,25$ pada bilangan Reynolds=97000

T (°C)	V (m/s)	n (gr)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	λ	T (Nm)	CoP	Cm
28	5,01	277,520	29,047	0	0,000	0,0095	0,089321	1,1791	0,880	0,000	0,000	0,000
28	5,01	255,640	26,757	15	200,000	0,0095	0,089321	1,1791	0,810	0,017	0,070	0,086
28	5,01	210,293	22,011	25	331,000	0,0095	0,089321	1,1791	0,666	0,029	0,095	0,142
28	5,01	174,120	18,225	35	410,667	0,0095	0,089321	1,1791	0,552	0,035	0,096	0,175
28	5,01	159,213	16,664	45	452,667	0,0095	0,089321	1,1791	0,505	0,038	0,096	0,189
28	5,01	142,460	14,911	55	491,333	0,0095	0,089321	1,1791	0,451	0,041	0,092	0,203
28	5,01	127,827	13,379	65	513,333	0,0095	0,089321	1,1791	0,405	0,042	0,084	0,208
28	5,01	109,920	11,505	75	550,000	0,0095	0,089321	1,1791	0,348	0,044	0,077	0,221
28	5,01	84,440	8,838	85	570,000	0,0095	0,089321	1,1791	0,268	0,045	0,060	0,225
28	5,01	52,780	5,524	135	642,667	0,0095	0,089321	1,1791	0,167	0,047	0,039	0,236
28	5,01	26,187	2,741	195	717,667	0,0095	0,089321	1,1791	0,083	0,049	0,020	0,243
28	5,01	0,000	0,000	215	600,000	0,0095	0,089321	1,1791	0,000	0,036	0,000	0,179

Tabel A.8 Data penelitian turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada jarak $y/D=0,25$ pada bilangan Reynolds=145000

T (°C)	V (m/s)	n (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	S (gr)	r (m)	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	λ	T (Nm)	CoP	Cm
31,3	7,5	526,99	55,16	0	0,000	0,0095	0,0893	1,16755	1,116	0,000	0,000	0,000
31,3	7,5	515,08	53,91	15	125,000	0,0095	0,0893	1,16755	1,090	0,010	0,025	0,023
31,3	7,5	473,96	49,61	35	308,333	0,0095	0,0893	1,16755	1,003	0,025	0,057	0,057
31,3	7,5	424,12	44,39	55	499,333	0,0095	0,0893	1,16755	0,898	0,041	0,084	0,093
31,1	7,5	370,18	38,75	75	660,000	0,0095	0,0893	1,16825	0,784	0,055	0,096	0,122
31,2	7,5	305,96	32,02	95	794,000	0,0095	0,0893	1,1679	0,648	0,065	0,095	0,146
31,1	7,5	245,38	25,68	135	961,667	0,0095	0,0893	1,16825	0,519	0,077	0,090	0,173
31,5	7,5	206,26	21,59	155	1025,000	0,0095	0,0893	1,16685	0,437	0,081	0,080	0,182
31,5	7,5	180,69	18,91	175	1124,667	0,0095	0,0893	1,16685	0,383	0,089	0,076	0,199
31,3	7,5	151,38	15,84	195	1160,000	0,0095	0,0893	1,16755	0,320	0,090	0,065	0,202
31,7	7,5	117,97	12,35	255	1230,000	0,0095	0,0893	1,16615	0,250	0,091	0,051	0,204
31,7	7,5	92,16	9,65	295	1318,667	0,0095	0,0893	1,16615	0,195	0,095	0,042	0,215
31,7	7,5	72,77	7,62	355	1416,667	0,0095	0,0893	1,16615	0,154	0,099	0,034	0,223
31,7	7,5	39,44	4,13	655	1735,000	0,0095	0,0893	1,16615	0,083	0,101	0,019	0,226
31,7	7,5	0,00	0,00	695	1625,000	0,0095	0,0893	1,16615	0,000	0,087	0,000	0,195

Tabel A.9 Data penelitian turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada jarak $y/D=0,25$ pada bilangan Reynolds=178000

T (°C)	V (m/s)	n (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	λ	T (Nm)	CoP	Cm
31,3	9,355	599,77	62,78	0	0,000	0,0095	0,0893	1,16755	1,018	0,000	0,000	0,000
31,3	9,355	584,19	61,14	15	100,000	0,0095	0,0893	1,16755	0,992	0,008	0,011	0,011
31,3	9,355	536,58	56,16	45	351,667	0,0095	0,0893	1,16755	0,911	0,029	0,038	0,041
31,3	9,355	511,63	53,55	75	495,000	0,0095	0,0893	1,16755	0,868	0,039	0,049	0,057
31,1	9,355	480,31	50,27	105	616,667	0,0095	0,0893	1,16825	0,815	0,048	0,056	0,069
31,2	9,355	454,65	47,59	135	743,333	0,0095	0,0893	1,1679	0,772	0,057	0,063	0,082
31,1	9,355	420,39	44,00	195	908,333	0,0095	0,0893	1,16825	0,714	0,066	0,068	0,096
31,5	9,355	388,16	40,63	225	1015,000	0,0095	0,0893	1,16685	0,659	0,074	0,070	0,106
31,3	9,355	346,09	36,22	315	1203,333	0,0095	0,0893	1,16755	0,587	0,083	0,070	0,120
31,7	9,355	255,22	26,71	435	1530,000	0,0095	0,0893	1,16615	0,433	0,102	0,064	0,148
31,5	9,355	203,34	21,28	475	1628,333	0,0095	0,0893	1,16685	0,345	0,107	0,054	0,155
31,8	9,355	87,99	9,21	545	1825,000	0,0095	0,0893	1,1658	0,149	0,119	0,026	0,173
31,8	9,355	58,84	6,16	565	1910,000	0,0095	0,0893	1,1658	0,100	0,125	0,018	0,181
31,8	9,355	0,00	0,00	675	1730,000	0,0095	0,0893	1,1658	0,000	0,098	0,000	0,142

Tabel A.10 Data penelitian turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada jarak $y/D=0,5$ pada bilangan Reynolds=97000

T (°C)	V (m/s)	n (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	λ	T (Nm)	CoP	Cm
31,5	5,01	403,97	42,28	0	0,000	0,0095	0,0893	1,16685	1,280	0,000	0,000	0,000
31,5	5,01	387,37	40,54	15	100,000	0,0095	0,0893	1,16685	1,228	0,008	0,049	0,040
31,5	5,01	378,67	39,63	25	140,000	0,0095	0,0893	1,16685	1,200	0,011	0,065	0,054
31,7	5,01	331,21	34,67	45	258,667	0,0095	0,0893	1,16615	1,050	0,020	0,105	0,100
31,7	5,01	304,89	31,91	65	368,000	0,0095	0,0893	1,16615	0,966	0,028	0,138	0,142
31,7	5,01	272,39	28,51	85	450,000	0,0095	0,0893	1,16615	0,863	0,034	0,148	0,172
31,5	5,01	231,51	24,23	105	537,667	0,0095	0,0893	1,16685	0,734	0,040	0,149	0,203
31,3	5,01	198,27	20,75	125	600,000	0,0095	0,0893	1,16755	0,628	0,044	0,140	0,223
31,3	5,01	139,32	14,58	185	694,000	0,0095	0,0893	1,16755	0,442	0,047	0,105	0,239
31,3	5,01	79,00	8,27	245	769,667	0,0095	0,0893	1,16755	0,250	0,049	0,062	0,246
31,3	5,01	44,87	4,70	305	827,000	0,0095	0,0893	1,16755	0,142	0,049	0,035	0,245
31,3	5,01	29,52	3,09	335	850,000	0,0095	0,0893	1,16755	0,094	0,048	0,023	0,242
31,3	5,01	0,00	0,00	355	500,000	0,0095	0,0893	1,16755	0,000	0,014	0,000	0,068

Tabel A.11 Data penelitian turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada jarak $y/D=0,5$ pada bilangan Reynolds=145000

T (°C)	V (m/s)	n (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	S (gr)	r (m)	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	λ	T (Nm)	CoP	Cm
29,8	7,5	496,66	51,98	0	0,000	0,0095	0,0893	1,1728	1,051	0,000	0,000	0,000
29,8	7,5	458,39	47,98	15	150,000	0,0095	0,0893	1,1728	0,970	0,013	0,027	0,028
29,8	7,5	386,29	40,43	35	400,000	0,0095	0,0893	1,1728	0,818	0,034	0,062	0,076
29,8	7,5	358,11	37,48	55	550,000	0,0095	0,0893	1,1728	0,758	0,046	0,078	0,103
29,9	7,5	333,70	34,93	75	637,667	0,0095	0,0893	1,17245	0,706	0,052	0,083	0,117
29,8	7,5	271,23	28,39	115	800,000	0,0095	0,0893	1,1728	0,574	0,064	0,082	0,143
29,8	7,5	246,27	25,78	135	883,333	0,0095	0,0893	1,1728	0,521	0,070	0,081	0,156
29,8	7,5	213,94	22,39	155	950,000	0,0095	0,0893	1,1728	0,453	0,074	0,075	0,166
29,8	7,5	180,65	18,91	175	995,000	0,0095	0,0893	1,1728	0,382	0,076	0,065	0,171
29,8	7,5	60,25	6,31	285	1190,000	0,0095	0,0893	1,1728	0,128	0,084	0,024	0,189
29,8	7,5	40,57	4,25	325	1220,000	0,0095	0,0893	1,1728	0,086	0,083	0,016	0,187
29,8	7,5	0,00	0,00	385	1000,000	0,0095	0,0893	1,1728	0,000	0,057	0,000	0,128

Tabel A.12 Data penelitian turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada jarak $y/D=0,5$ pada bilangan Reynolds=178000

T (°C)	V (m/s)	n (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	S (gr)	r (m)	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	λ	T (Nm)	CoP	Cm
29,5	9,088	568,05	59,46	0	0,000	0,0095	0,0893	1,17385	0,992	0,000	0,000	0,000
29,5	9,088	537,77	56,29	15	300,000	0,0095	0,0893	1,17385	0,940	0,027	0,038	0,040
29,8	9,088	440,82	46,14	45	650,000	0,0095	0,0893	1,1728	0,770	0,056	0,066	0,086
29,5	9,088	405,52	42,44	75	800,000	0,0095	0,0893	1,17385	0,708	0,068	0,073	0,103
29,5	9,088	392,13	41,04	105	915,333	0,0095	0,0893	1,17385	0,685	0,076	0,079	0,115
29,5	9,088	360,92	37,78	135	1056,667	0,0095	0,0893	1,17385	0,631	0,086	0,082	0,131
29,3	9,088	316,59	33,14	205	1251,333	0,0095	0,0893	1,17455	0,553	0,098	0,082	0,148
29,5	9,088	276,17	28,91	245	1355,000	0,0095	0,0893	1,17385	0,482	0,103	0,076	0,157
29,5	9,088	254,95	26,68	275	1424,667	0,0095	0,0893	1,17385	0,445	0,107	0,073	0,163
29,5	9,088	127,03	13,30	315	1556,667	0,0095	0,0893	1,17385	0,222	0,116	0,039	0,176
29,3	9,088	54,03	5,65	435	1828,333	0,0095	0,0893	1,17455	0,094	0,130	0,019	0,198
29,5	9,088	0,00	0,00	485	1600,000	0,0095	0,0893	1,17385	0,000	0,104	0,000	0,158

Tabel A.13 Data torsi statis turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu dan dengan silinder pengganggu pada jarak $y/D=0,5$

$\theta(^{\circ})$	Ts (N-cm) (tanpa silinder pengganggu)			Ts (N-cm) (dengan silinder pengganggu, $y/D=0,5$)		
	Re=97000	Re=145000	Re=178000	Re=97000	Re=145000	Re=178000
0	1,50	3,70	3,22	0,27	1,74	3,11
10	2,00	5,30	7,02	0,98	2,77	4,44
20	2,10	6,30	7,63	1,10	4,13	5,65
30	2,30	6,56	7,88	1,79	4,52	7,76
40	2,02	5,90	7,24	2,10	4,45	5,97
50	1,55	4,39	6,7	1,89	4,17	5,64
60	1,42	3,92	5,83	1,41	3,70	4,77
70	1,08	3,78	4,59	1,38	3,38	4,63
80	0,68	2,80	3,67	1,31	2,74	3,79
90	0,54	1,91	3,06	1,29	1,65	3,19
100	0,06	0,82	2,03	1,18	1,70	3,28
110	0,04	0,34	1,58	0,90	1,49	1,84
120	-0,10	0,10	0,93	0,63	0,52	1,09
130	-0,16	-0,33	0,01	0,06	0,50	0,92
140	-0,64	-0,71	-1,22	-0,04	-0,34	-0,16
150	-0,73	-1,61	-2,03	-0,45	-0,40	-0,74
160	-0,78	-1,31	-0,02	-0,20	0,38	-0,46
170	0,31	0,33	2,1	0,07	0,60	0,77
180	1,15	3,65	3,34	0,27	1,22	2,06

Tabel A.14 Data peningkatan putaran turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu

Re	Putaran (rpm)				Peningkatan (%)		
	Tanpa silinder pengganggu	Dengan Silinder Pengganggu					
		y/D=0	y/D=0,25	y/D=0,5	y/D=0	y/D=0,25	y/D=0,5
97000	374,57	241,34	277,52	403,97	-	-	7,85
145000	609,20	476,14	526,99	496,66	-	-	-
178000	632,86	490,95	599,77	568,05	-	-	-

Tabel A.15 Data peningkatan CoP turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu

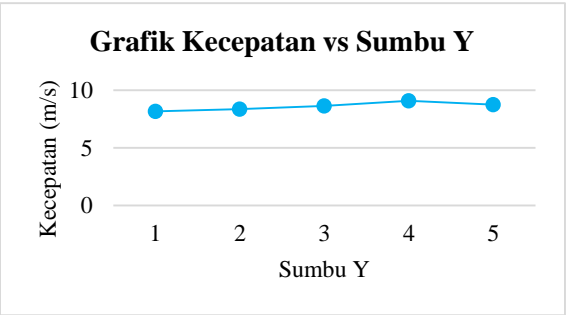
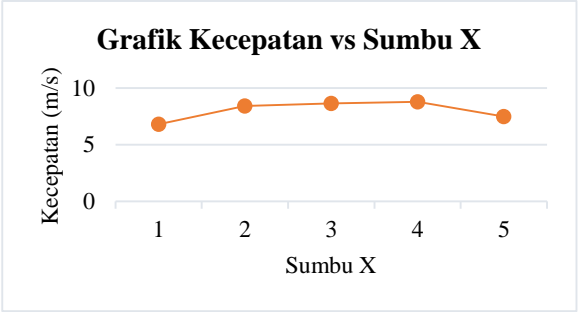
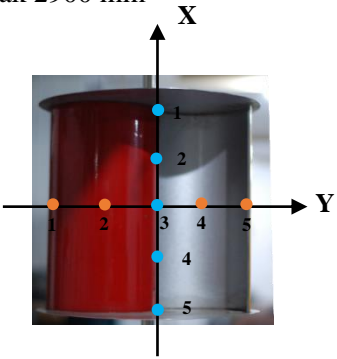
Re	CoP				Peningkatan (%)		
	Tanpa silinder pengganggu	Dengan Silinder Pengganggu					
		y/D=0	y/D=0,25	y/D=0,5	y/D=0	y/D=0,25	y/D=0,5
97000	0,154	0,080	0,096	0,149	-	-	-
145000	0,133	0,077	0,096	0,083	-	-	-
178000	0,085	0,038	0,070	0,082	-	-	-

Tabel A.16 Data peningkatan Cm turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu

Re	Cm				Peningkatan (%)		
	Tanpa silinder pengganggu	Dengan Silinder Pengganggu					
		y/D=0	y/D=0,25	y/D=0,5	y/D=0	y/D=0,25	y/D=0,5
97000	0,300	0,211	0,243	0,246	-	-	-
145000	0,232	0,179	0,226	0,189	-	-	-
178000	0,197	0,125	0,181	0,198	-	-	-

Tabel A.17 Data *uniformity* pada jarak 2900 mm

Posisi	Sumbu	
	X	Y
1	6,82	8,18
2	8,43	8,36
3	8,64	8,64
4	8,78	9,07
5	7,49	8,76



“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BIODATA PENULIS



Tsalatsatul Maulidiyah dilahirkan di Gresik pada tanggal 07 Desember 1995, Penulis menempuh pendidikan di MI Roudhotut Tholibin, SMP Negeri 1 Gresik, dan kemudian SMA Negeri 1 Gresik, Pada tahun 2014, penulis melanjutkan ke perguruan tinggi negeri, tepatnya menjadi mahasiswa di Jurusan Teknik Mesin Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya, Saat ini penulis menjadi anggota aktif Laboratorium Mekanika dan Mesin Fluida,

Selama perkuliahan, penulis aktif menjadi Asisten Praktikum pada Laboratorium Mekanika Fluida dan Mesin Fluida pada tahun 2017, Penulis juga terlibat aktif dalam kegiatan organisasi kampus, tercatat sebagai staff Kementerian Hubungan Luar BEM ITS 2015/2016 dan Kepala Biro Kelembagaan Departemen Hubungan Luar HMM 2016/2017, Apabila terdapat kritik maupun saran, dapat menghubungi penulis melalui e-mail dengan alamat maulidiyahts@gmail.com.